

**Anatomische und physiologische Untersuchungen
der Abbauerscheinungen in Gramineenblättern
bei der Heubildung**

Christl Zentz

Anatomische und physiologische Untersuchungen
der Abbauerscheinungen in Gramineenblättern
bei der Neubildung

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Ludwig-Maximilians-Universität
zu München



vorgelegt
von
Christl ZENTZ
aus
München

April 1959

Referent: Professor Dr. L. Brauner

Tag der mündlichen Prüfung: 24. Juni 1959

Inhaltsverzeichnis

	Seite
I. Einleitung	1
II. Literaturübersicht	2
III. Anatomischer Teil	17
1. Untersuchungen an frischem Material	18
2. Untersuchungen an normalem Heu	19
3. Untersuchungen an selbsterhitztem Material	21
4. Untersuchungen an künstlich erhitztem Material	23
5. Erklärungen der Abbildungen des anatomischen Teiles	25
6. Mikrophotos und Zeichnungen	27
IV. Selbsterhitzungsversuche in Dewargefässen	32
1. Versuchsanordnung	32
2. Einfluss des Wassergehaltes	33
3. Einfluss der Düngung	37
4. Gasanalysen	41
5. Einfluss des Luftsauerstoffes	58
V. Diskussion der Versuchsergebnisse im Hinblick auf ihre Auswertung für die Praxis	60
VI. Zusammenfassung	66
VII. Literaturverzeichnis	69
VIII. Schlusswort	74



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Ich widme diese Arbeit dem Andenken meines Großvaters

GEHEIMER KOMMERZIENRAT EUGEN ZENTZ

Ehrenbürger der Ludwig-Maximilians-Universität

Ehrenbürger der Technischen Hochschule München

I. EINLEITUNG

Alljährlich werden in der Welt riesige Pflanzenmengen geerntet, um sie für die Tierfütterung bereitzustellen. Einen Teil davon speichert man, um die tägliche Nahrung des Tieres zu sichern.

Es besteht nun die sehr gefürchtete Möglichkeit, dass sich derartige Vorräte selbst erwärmen. Die Temperatursteigerung kann mehr oder weniger rasch zunehmen, und kann ebenso leicht wieder abflauen. Oft aber gelangt sie zu einem Höhepunkt, der eine Selbstentzündung des Vorratsgutes zur Folge hat.

Derartige Erscheinungen beobachtete man bereits, wie die Geschichtsschreibung zeigt, vor nahezu 2000 Jahren. Auch heute steht man noch vor teilweise völlig ungeklärten Tatsachen. Ganz abgesehen von Selbsterhitzungsfällen bei Getreide und anderen Erntestoffen, stellt allein für Heu und Grummet der alljährliche Schaden in den einzelnen Ländern Millionenbeträge dar.

1956 wurden in Deutschland insgesamt 1545 Überhitzungen in Heu-, Grummet- und Getreidestöcken festgestellt.

Die Wiederherstellungskosten der durch Brand zerstörten oder beschädigten Gebäude betrugen DM 22.089.433.--; davon entfielen auf Selbstentzündung insgesamt DM 1.238.061.--, das sind rund 5,4%.

Das Pflanzenmaterial wird von der Landbevölkerung in die eigenen Vorratsstellen eingebracht, die zumeist dicht bei den Wohngebäuden liegen. Tritt hier der Brandfall im Verlauf der Selbsterhitzung ein, so fallen oft Stallungen und Wohngebäude dem Unglück ebenfalls zum Opfer.

Es lag also nahe, dass man gerade dieser Art von Selbstentzündungen pflanzlichen Materials besondere Aufmerksamkeit widmete. Somit erstrecken sich auch fast alle wissenschaftlichen Arbeiten, welche sich mit diesem Problem befassen, unmittelbar auf

die Selbsterwärmung von Heustöcken. Das soll anhand einer Literaturzusammenstellung gezeigt werden. Ohne Zweifel hat man die eine oder andere Frage einer Klärung näher bringen können. Häufig ist aber der Kreis viel zu eng gezogen worden, und manche Untersuchungen wurden zu sehr nur aus dem Wunsch heraus durchgeführt, dem Landwirt rasch einen guten Rat zu geben, wie er sich vor Schaden schützen könne.

Die komplizierten pflanzenphysiologischen Zusammenhänge, die ohne Zweifel hier von ausschlaggebender Bedeutung sind, fanden viel zu wenig Beachtung. Von der Praxis aus gesehen betrifft die Behandlung eines Heustockes in erster Linie den Landwirt. Die wissenschaftliche Forschung hingegen muss in diesem Falle von der rein botanischen und chemischen Seite her unterstützt werden.

Wenn man bei einer umfangreichen Bearbeitung des gesamten Fragenkomplexes einen nennenswerten Erfolg erzielen will, so ist die Koordinierung aller Ergebnisse der verschiedenen Arbeitsrichtungen unerlässlich.

In diesem Gedanken soll die vorliegende Abhandlung - unter Berücksichtigung aller zur Zeit erfassten Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen - eine Vorarbeit leisten. Nach einem chronologischen Überblick der in der Literatur bereits vorhandenen Untersuchungsergebnisse, wird die pflanzenanatomische und pflanzenphysiologische Richtung speziell weiterverfolgt.

11. LITERATURERWÄHNUNG

Das Problem der Selbsterwärmung und Selbstentzündung von Mirkofutter dürfte zu jenem Zeitpunkt erstmals aufgetreten sein, als die Menschen begannen, Vorräte an Futter zu sammeln, um ihre Haustiere im Winter füttern zu können. Es ist deshalb nicht erstaunlich, dass die ersten bekannten Aufzeichnungen zu Beginn unserer Zeitrechnung gemacht wurden, zu einer Zeit, da die römische Landwirtschaft relativ hoch entwickelt war.

COLUMELLA und PIINUS (ca. 60 n.Chr.) erwähnen in ihren Schriften die Selbsterhitzung und Selbstentzündung und weisen darauf hin, dass zu großer Wassergehalt des zusammengebrachten Futters als Ursache einer Erwärmung zu betrachten sei: "Das geschnittene Heu muß in der Sonne gekehrt und nicht anders als trocken zusammengebracht werden. Wenn dies nicht sorgfältig beobachtet wird, so wird man morgens Nebel daraus aufsteigen sehen, und bald wird er von der Sonne angezündet werden und verbrennen."

Im Jahre 942 schreibt ABU DOLEH MISARIS BEN MOHALHAL über ein Rohr, welches, "wenn es trocken ist und vom Wind bewegt wird, durch das Aneinanderschlagen der Halme oft Feuer fängt, so daß größere Feuersbrünste dadurch entstehen."

Erst zu Beginn der Neuzeit trifft man wieder Beschreibungen und Erklärungsversuche des Selbsterhitzungsproblems.

M. BACO DE VERULAN (um 1500) glaubt, die Selbsterhitzung und Selbstentzündung auf die in den Pflanzen verborgene Wärme zurückführen zu müssen.

DESCARTES gibt 1644 in seinen Principia philosophiae folgenden Erklärungsversuch für die Selbsterwärmung von Heu: "Dass die Teilchen mancher Spirituosen und Flüssigkeiten bei ihrem Eintritt in die Gänge eines harten oder auch eines flüssigen Körpers Feuer erregen können, zeigt das feuchte Heu, wenn es eingeschlossen ist. Wenn das frische Gras erhitzt sich, wenn es feucht verpackt wird, und schlägt zuletzt in Flammen aus, weil viele Spirituosen oderäfte durch die Poren der grünen Gräser, welche von den Wurzeln nach der Spitze aufzusteigen pflegen, und dort die, ihrer Größe angemessenen Wege hatten, in dem geschnittenen Grase sich befinden. Werden sie nun in einem engen Raum eingeschlossen, so finden die Teilchen dieser Pflanzen bei ihrer Wanderung aus einem Grase in das andere viele Hindernisse, die schon zu vertrocknen anfangen und enger werden, so daß sie nicht mehr hereinkönnen. Sie werden so zu schnelleren Bewegungen getrieben, was die Reibung erhöht und dann das Gras Feuer fangen lässt."

In den Neuen Nordischen Peträgen (St. Petersburg und Leipzig) schreibt GEORGI 1783:

„Im Pflanzenbereich ist die Selbsterhitzung nasser aufzehrender Substanzen, des Mehles, Malzes und gärender Dinge eine tägliche, und die Selbstentzündung nassen Heues eine zwar seltene, aber gewisse Erscheinung.“

H.R.GÖPPERT weist 1832 als erster auf die Atmung der Pflanzen und die dabei entwickelte Wärme hin.

L.A. BUCHNER versucht 1873 eine biochemische Erklärung zu geben. Feuchtes Heu, in großen Massen aufgeschichtet, soll eine Gärung mit starker Wärmeentwicklung erleiden. Die dadurch bedingte Zersetzung des Futters erzeuge eine Wärme. Wenn der größte Teil des im Futter enthaltenen Wassers verdampft sei, könnte durch fortgesetzte Sauerstoffanziehung und Verwesung unter besonders günstigen Bedingungen die Hitze bis zur Entflammung gesteigert werden.

Bei der Zersetzung erleide das Heu eine gewisse Verkohlung. Durch große Porosität und Oxydationsbereitschaft erhalte die Masse die Eigenschaften eines Pyrophors, d.h. bei Luftzutritt könnte sich diese auf der Oberfläche der Kohlein so hohem Mass verdichten, dass die Futtermassen ins Glühen und zur Entflammung kämen.

Um pyrophore Kohle aus Grummet herzustellen, stellt H. RANKE (1873) eine Temperatur von ca 300°C fest. Größter Wichtigkeit schreibt er dabei der Tatsache zu, daß im Innern eines großen Haufens Grummet von der, durch chemische Umgestaltung seiner Bestandteile freigewordene Wärme fast nichts verloren geht:

„Das Grummet ist ein so schlechter Wärmeleiter, daß der in seinem Kern verkohlte Stock außen noch die normale grüne Farbe des Grummets, und keine wahrnehmbare Temperaturerhöhung zeigt.“

GEORG DRAGENDORFF (1882) beschreibt genaue Methoden, das in Pflanzen vorhandene Lignin gewichtsmäßig zu erassen.

M. BERTHELOT (1893) schreibt das Phänomen der Selbsterwärmung besonderen Fermentationen zu; hier soll das Ferment nur die Rolle des Erregers spielen, die eigentliche wärmeerzeugende Reaktion soll eine chemische sein (aus seinen Arbeiten 1865). „Diese Oxydationen sind von der chemischen Reihe; sie werden mehr und mehr erzeugt durch die Temperatur, die sie selbst

erzeugt haben; dies genügt, um das Heu vollständiger zu trocknen und entzündliche Stoffe zu erzeugen. Die zur Verursachung der Entflammung fähige Temperaturerhöhung ergibt sich aus lediglich chemischen Reaktionen."

MEDEM (1904) glaubt, daß er die Selbstentzündung eines bereits erwärmten Stockes verhindern könne, indem er ihn vor vermehrter Sauerstoffzufuhr schützt. Zu diesem Zweck wurde ein Versuch unternommen, bei dem ein erhitzt gemessener Stock (70°C) nicht abgetragen wurde. Durch Festtreten und gutes Verschliessen der Scheune wurde die Luft "ausgesperrt". Trotzdem kam es zur Entzündung !

Beim Abtragen des übrig gebliebenen Heuhaufens entstiegen dem Heu fortwährend Gase, die sich von Zeit zu Zeit entzündeten. — HUGO MIEHE, der sich Jahre hindurch immer wieder mit dem Problem der Selbsterwärmung und Selbstentzündung von Heu befaßt hat, veröffentlicht 1905 eine Arbeit über Braunheubereitung, in der er sich der Meinung Medems anschließt, daß der Luftsauerstoff auf die Selbsterwärmung einen bedeutenden Einfluß haben soll, allerdings in Verbindung mit der Lebenstätigkeit von Mikroorganismen:

" Je lockerer die Schichtung ist, desto stärker wird die Erwärmung eintreten können, da die Lebenstätigkeit dieser Klebewesen hauptsächlich vom Maß des vorhandenen Sauerstoffs abhängig ist."

1907 kommt MIEHE zu der Auffassung, daß die Selbsterwärmung im Gebiete von $20-70^{\circ}\text{C}$, abgesehen von kleinerer Wärmeproduktion durch Atmung, durch mikrobielle Tätigkeit erfolge.

In einer umfassenden Arbeit, die 1911 erscheint, beweist MIEHE experimentell seine Aussage, daß eine mikrobielle Beeinflussung des Selbsterwärmungsprozesses vorliegen muß: Mit Wasserdampf sterilisiertes Heu ist keiner Selbsterwärmung fähig! Wird dieses Heu aber mit einer Nährlösung übergossen, die *Colibacillus* in Reinkultur enthält, ist eine Steigerung der Temperatur bis 42°C möglich.

Versuche mit 47 Ztr. Wiesenheu ergaben Maximaltemperaturwerte von $68,5^{\circ}\text{C}$ im Kern des 3,5 m hohen Stockes (Wassergehalt 31,4%).

Miehe versucht als erster eine Trennung zwischen dem Prozeß der Selbsterwärmung und der Selbstentzündung klarzulegen, indem er sagt: „Die Ursache der Selbsterwärmung und Selbstentzündung ist nicht dieselbe! Vielmehr schafft die Selbsterwärmung nur die Bedingungen, unter denen schließlich die Selbstentzündung eintreten kann.“

FRIEDRICH BÖCK (1907) gibt sich mit einer sehr einfachen Erklärung zufrieden, indem er sagt, daß den Vorgängen der Selbsterwärmung und Selbstentzündung nichts Übernatürliches anhafte. Sie seien nichts anderes als jene Abbauvorgänge, die sich sowieso im Innern der Pflanze abspielen, lediglich in beschleunigter Form.

Die Aussage von Miehe, daß Mikroorganismen bei dem Selbsterwärmungsprozeß eine Rolle spielen, wird von BOEKHOUT und DE VRIES bestritten (1906-1916). Sie deuten die Selbsterhitzung als einen, durch die Einwirkung des Luftsauerstoffes bedingten chemischen Vorgang, und glauben, daß auch die Tabakfermentation sich bald als ein chemischer Prozeß erweisen würde. In der 1906 erscheinenden Arbeit suchen sie nach „der zur Selbsterhitzung Veranlassung gebenden Substanz“; sie fanden aber, „daß das Agens der Erscheinungen der Selbsterhitzung weder löslich noch isolierbar ist“. Die Einwirkung des Luftsauerstoffes soll zustande kommen durch Intervention bestimmter, in der Pflanze vorkommender Metalle, z.B. Eisen und Mangan (1908). Bei den chemischen Versuchen stellen sie fest, daß bei der Selbsterhitzung des Heues Purfurol entsteht.

Eine andere Theorie der Selbsterwärmung entwickelt A. TSCHIRCH (1918), wonach im frisch aufgestockten Heu durch die Tätigkeit der Oxydationsenzyme eine mässige Temperatursteigerung stattfinden soll.

Nach dem Verbrauch des freien Sauerstoffes sollen bei genügender Feuchtigkeit bei etwa 50-70°C reduzierende Enzyme ihre Tätigkeit aufnehmen; dabei soll das Heu einerseits immer sauerstoffreicher werden, andererseits

freier Sauerstoff auftreten, der sich schließlich mit der kohligten Masse unter explosionsartigen Erscheinungen verbindet. Mikroorganismen sollen dabei höchstens eine sekundäre Rolle spielen.

R.BURRI (1919) findet keine Vermehrung der Bakterien im gärenden Futterstoff und glaubt, daß unter Umständen die Atmungswärme der aufgestockten Pflanzenmasse genüge, um eine Temperaturerhöhung bis auf etwa 60°C zu führen. Bei dieser Temperatur sollen die chemischen Vorgänge aber bereits so intensiv sein, daß eine Temperatursteigerung auf rein chemischem Wege möglich sei.

Nach der Ansicht von G. LAUPPER (1920) sollen durch die gesteigerte Atmung und das beginnende Schwitzen die im Heu noch vorhandenen Oxydasen aktiviert werden. Die dadurch bedingten Reaktionen erzeugten Wärme, die im Futterstock angesammelt würde, und Voraussetzung für die, bei höherer Temperatur eintretenden chemischen Vorgänge sei. In einer späteren Veröffentlichung 1929 kommt Laupper auf Grund seiner Selbsterwärmungsversuche mit Leinöl zu dem allgemeinen Schluß, daß Selbstentzündungen überall da zu erwarten sind, wo sich autoxydable Substanzen in feinem Verteilungszustand befinden, und wo die Möglichkeit der Entstehung eines Wärmeabschlusses gegeben sei.

Während Miehle versuchte, durch die Zweiteilung Selbsterwärmung - Selbstentzündung der Klärung des Problems näher zu kommen, beschreibt NOLZ (1926) die Teilung in biologische und chemische (oder physikalische) Wärmequellen. Er ist der Ansicht, daß die Faktoren, die die Selbsterhitzung des Heues einleiten und bis zu einem gewissen Maße auch zu steigern imstande sind, biochemischer Natur sein müßten. Diese biologischen Wärmequellen müßten durch chemische oder physikalische abgelöst werden, wenn es zur Selbstentzündung kommen sollte (Oxydationsprozesse).

„Da Heu ein schlechter Wärmeleiter ist, überwiegt die gebildete Wärme die abgeführte. Die dadurch entstandene Temperatur ruft eine trockene Destillation des Heues hervor.

Dabei treten brennbare Gase auf, von denen H_2S und CO nachgewiesen sind". Sie dürften, nach NoIz, neben der gleichzeitig erfolgenden Umwandlung des Heues zu einer pyrophoren Masse in erster Linie für das Zustandekommen einer Entzündung maßgebend sein.

W. KINZEL (1926) schreibt die erste Temperaturerhöhung (wie Mische) ebenfalls der Lebenstätigkeit und Vermehrung von Bakterien zu. Die, im Silo wie im Trockenheu, erreichte oberste Temperaturgrenze dürfe aber im Höchstfall und nur für kurze Zeit 60° erreichen, da über diese Grenze hinaus bedeutende Nährwerte vernichtet werden.

Hier sollen gleich die sehr anschaulichen Ergebnisse der Arbeit von J. GEERING (1939) angeschlossen werden, der schreibt:

Es ist nicht nur die Gefahr eines Brandes, der bei der "Selbsterhitzung von eingebrachtem Futter entstehen kann: mit steigender Temperatur sinkt der Futterwert. Steigt die Temperatur über $70^{\circ}C$ an, so hat man es mit einer eigentlichen Übergärung zu tun. Der Stärkewert des Futters sinkt um 10 bis 30%, der Gehalt an verdaulichem Eiweiss geht innerhalb weniger Tage um 30 - 80% zurück. Überschreitet die Stocktemperatur 75 Grad, so spricht man von einer Überhitzung. Die Schädigungen des Stärkewertes belaufen sich auf 30-60%, während der Gehalt an verdaulichem Eiweiss rasch ganz verloren geht. Verfütterung wird nicht mehr angeraten.

Die Auswirkungen bei Verfütterung von übergorenem und überhitztem Futter zeigen sich im Ausfall des Viehbestandes, der im einen Fall 30%, im anderen sogar 60% betragen kann."

Nach F. HILDEBRAND (Diss. 1927) soll die Selbsterwärmung des Heues vorwiegend durch Pilze eingeleitet werden. "Die Weiterführung der Erwärmung über 40° übernimmt *Bacillus calfactor*, möglicherweise im Verein mit *Thermophilus actinomyces*. Bei 70 Grad ist die biologische Selbsterwärmung beendet."

In der 1928 erschienenen amerikanischen Arbeit untersuchen JAMES und PRICE die Selbsterhitzung von Heustöcken, die durch Überschwemmung in den Staaten Vermont und Massachusetts (USA) hervorgerufen wurde.

In jedem Stock mit nassem Heu wurde beobachtet, daß eine Erwärmung (heating) eingetreten war. Die Höchsttemperatur, ausser bei Entzündung, betrug 74 Grad.

In einem Fall soll Selbstentzündung schon 2 Tage nach dem Zurückweichen des Wassers eingetreten sein. Der Stock, der sich selbst entzündet hatte, (fired spontaneously) war der einzige, der eine kleinere Menge Alfalfaheu enthielt.

E. TRUMINGER (1929) diskutiert die bis dahin vorliegenden Theorien und bespricht ausführlich die verschiedenen möglichen Ursachen, die von früheren Autoren als Grund für die Erwärmung, Überhitzung und Selbstentzündung von Dürrfuttern angegeben worden waren.

In der, ebenfalls 1929 erschienenen Arbeit von BROWNE werden die bisher vorliegenden Ergebnisse von Ranke, Miede, Tschiroh, Burri, Hildebrand, Boekhout, de Vries und Laupper besprochen.

Im Anschluß an die Versuche von Laupper, nach denen Selbstentzündung in Heu stattgefunden haben soll, das gut getrocknet war und in gleichmäßig getrockneter Form in die Scheune eingebracht wurde, diskutiert Browne seine eigenen Versuche auf diesem Gebiet: In einem solchen Heuhaufen beginnt die Feuchtigkeit sofort, sich von den wärmeren zu den kälteren Teilen der Masse abzusetzen, mit dem Ergebnis, daß lokale Zonen höheren Wassergehaltes entstehen, die sich dann zu erhitzen beginnen. Der ganze Heustock wird dadurch in einen Zustand sehr ungleicher Feuchtigkeitsverteilung gebracht. Neben übernassen und übertrockenen Teilen aber befindet sich an manchen Stellen eine Zwischenzone, in der die Bedingungen von Wassergehalt, Temperatur, Anwesenheit oxydierbarer Zersetzungsprodukte, Katalysatoren, und die Isolierung für eine rasche Oxydation und Selbsterhitzung genau zutreffen .

1930 erscheint hochmals eine Arbeit von Miehle, in der er auf Grund seiner Untersuchungen die Auffassung vertritt, daß der Hauptanteil bei der Selbsterhitzung bis ca 65 Grad auf die Lebenstätigkeit der im Heuhaufen sich vorfindenden Pilze entfalle. Gewisse Bakterienarten sollen in zweiter Linie für die Wärmebildung verantwortlich sein. Der Atemtätigkeit der Überlebenden Heupflanzenteile misst Miehle nur geringe Bedeutung bei.

Bacillus calfactor soll die Temperatur bis auf etwa 75 Grad steigern können. Über 75 Grad soll nur noch die rein chemische Oxydation der lagernden Pflanzenmassen als Ursache vermehrter Wärmeproduktion in Frage kommen. Über den Verlauf der Temperatursteigerung über 75 Grad gibt Miehle keine weitere Erklärung.

Auch in Selbsterwärmungsversuchen wachsender Keimlinge von *Helianthus annuus* stellt Miehle fest, daß die Selbsterwärmung bis ca 75 Grad im wesentlichen durch die Lebenstätigkeit der in den betreffenden Pflanzenmaterialien vorkommenden Mikroorganismen bedingt sei.

Miehle knüpft damit an das Ergebnis seiner 1926 erschienenen Arbeit an, in der er schreibt:

„Es ist sicher, daß durch die Behandlung mit sehr verschiedenen antiseptischen Stoffen die Selbsterhitzungsfähigkeit pflanzlicher Stoffe völlig aufgehoben wird.“

Gegen die Verallgemeinerung dieser Ergebnisse wendet sich H. JENSEN (1930). Er weist darauf hin, daß die Mikroorganismen bei dem Prozeß der Tabakfermentation, die sich auf enzymatischem Wege in einem relativ trockenen Substrat abspielt, nur unwesentlich mitwirken.

Weiterhin bestätigt er durch Versuche, daß die Tabakfermentation durch Antiseptika nicht verhindert wird und infolgedessen nicht als ein mikrobiotischer Vorgang betrachtet werden kann. Jensen kommt zu dem Schluss, daß Heufermentation und Tabakfermentation zwei ganz verschiedene Prozesse sind: der erste ein mikrobiotischer, der zweite ein enzymatischer.

1935 erscheinen weitere Ergebnisse von M. PHILLIPS und Mitarbeitern. Die versetzten Heuproben mit einer Nährlösung und hielten diese 30 Tage lang bei 30°C. Am stärksten abgebaut wurden leicht hydrolisierbare Bestandteile, während das Lignin der Zersetzung am besten widerstand. Die Verfasser weisen dann auf eine mögliche Rolle des Lignins bei der Selbstentzündung (spontaneous ignition) von Heu hin.

Bei den Versuchen von Phillips wurden die leicht hydrolisierbaren Substanzen, die das Lignin einhüllen, in der ersten Züchtungsstufe durch Bakterien und Pilze zersetzt. Das so freigelegte Lignin soll unter diesen Bedingungen unter starker Wärmeabgabe leicht Sauerstoff absorbieren. Durch die damit verbundene Temperatursteigerung - bis über 80°C - soll die thermische Zersetzung des Lignins beginnen. Diese leicht oxydierbaren Zersetzungssubstanzen würden ihrerseits wieder Sauerstoff aufnehmen, wodurch die Temperatur, unter Umständen bis zum Entzündungspunkt, ansteigen soll.

Es ist wichtig, hervorzuheben, daß ein entscheidender Unterschied zu bestehen scheint zwischen dem Lignin, wie es natürlich in den Pflanzen vorkommt, und dem freien oder isolierten Lignin. LINGGHEIM und FUCHS, und später auch DELIE (1932) haben gezeigt, daß isoliertes Lignin durch Boden-Mikroorganismen zersetzt werden konnte.

Dagegen berichten FORNEY und LUSHWELL (1930), daß es ihnen nicht möglich war, isoliertes Lignin zu vergären (to ferment), obwohl natürlich vorkommendes Lignin in den Heustücken verrotten werden konnte.

In weiteren Arbeiten bestätigen sie, daß das natürliche Lignin durch Bodenbakterien wenigstens teilweise zersetzt werden kann, wenn auch im allgemeinen der Anteil der Zersetzung weniger hoch ist als bei Zellulose und Hemizellulose.

FORNEY und WALSHMAN (1929) dagegen berichten von Versuchen, in denen das natürliche Lignin von Alfalfahheu unter anaeroben Bedingungen praktisch quantitativ bewahrt wurde.

JUON (1934) beschreibt in einem Artikel Versuche, in denen Grünfutter, welches der Gärung ausgesetzt war, eine Einbusse an Lignin erlitt. In den meisten Fällen war aber die Ausbeute sehr gering.

Die Untersuchungen von E.J. HOFFMANN (1936) befassen sich hauptsächlich mit der Gasbildung im selbsterhitzten Dürrofutterstock. Nach der biologischen Tätigkeit im erwärmten Heustock soll sich eine rein chemische Oxydation abspielen, die offenbar durch einen Verlust von Sauerstoff hervorgerufen wird, möglicherweise in Verbindung mit einer übermäßigen Bildung von CO_2 . Hoffmann stellt fest, daß im allgemeinen mit steigender Übergärung der CO_2 -Gehalt zu, der O_2 -Gehalt der Heustockgase abnimmt.

Von HOFFMANN und BRADSHAW (1937) wurden sieben Großversuche mit Heustöcken durchgeführt.

Es wurde der Umfang des Verlustes organischer Heubestandteile, hervorgerufen durch Selbsterhitzung, bestimmt. Die Versuchsdauer betrug 1-7 Monate. Der Wassergehalt des Versuchsmaterials lag zwischen 10-60%.

Der Verlust organischer Substanzen wurde gewichtsmäßig festgestellt. In den Versuchen, in denen die Durchschnittsfeuchtigkeit des Heues sehr hoch war, betrug der Höchstverlust organischer Bestandteile 22%, der Mindestverlust 4%; es lag also ein Durchschnittsverlust von nahezu 13% vor.

HÜNI (1944) entwickelte folgende Theorie für die Selbsterhitzung von Heustöcken:

Die fermentativen Prozesse, die bei der Selbsterhitzung von Heu eine Rolle spielen, sind ungefähr bis zu einer Temperaturhöhe von 70-80°C wirksam.

Die Erklärung für den raschen Temperaturanstieg nach dem Aufstocken von Heu ist die Tatsache, daß das eingebrachte Heu im Stock weiteratmet. Dabei entstehen Kohlensäure und Wasser, ein Vorgang, der stets mit einer Wärmeproduktion verbunden ist. Wenn nun diese Wärmebildung rascher erfolgt, als ihre Abführung aus dem Stock möglich ist, steigt die Temperatur an. Die Wärme akkumuliert sich im Stock.

Im eingebrachten Heu wirken die in der lebenden Pflanze enthaltenen Fermente weiter, wenn auch in schwächerem Maße. Die Atmungsfermente setzen die Oxydation fort, zahlreiche Fermente (z.B. die Desmolasen) bauen die Pflanzenstoffe des stark eingedickten Zellsaftes und der Zellwand ab. Dabei entstehen neue Stoffe mit neuer Oxydationsbereitschaft. Diese Selbstauflösungsvorgänge (Autolysen) führen innerhalb des aufgestockten Futters zu weiterem Temperaturanstieg.

Durch das Verdampfen des Wassers **sitzt** das Heu **stark** zusammen; es entstehen sogenannte „Fladen“, deckelförmige, undurchlässige Gebilde, die eine Art Wärmekammer abschliessen, in der die Zersetzung der angesammelten Stoffe **begünstigt** wird (Laupper).

Gewisse thermostabile Fermentsysteme können bis zu 80°C vertragen. Zu diesen autolytisch wirkenden Fermenten der abgestorbenen Pflanzen gesellt sich noch die Tätigkeit spezifischer Wirkstoffe von Mikroorganismen.

Da bei Temperaturen über 80°C die meisten Fermente abgetötet werden, muß die folgende Temperaturerhöhung auf chemischem Wege (chemische Autoxydation) **erfolgen**. Aus der fermentativen biologischen Anheizperiode **gelangt** der **Stock** nun in ein rein chemisches Anheizstadium. Solange noch grössere Wassermengen verdampft werden müssen, wird die Stocktemperatur nicht über 100°C ansteigen.

Beim Verschwinden des Wassers aber setzt ein neuer, **rascher** Temperaturanstieg ein, der bis zur Inbrandsetzung führen kann.

Ein übereinstimmendes Untersuchungsergebnis mit den Arbeiten von James und Price (1928) liegt aus der Schweiz vor. PALLMAN, JÜNI und DÖNZ (1945) zeigen in Großversuchen, daß die botanische Zusammensetzung des Heues den Wärmehaushalt der Stöcke beeinflussen kann:

Drei Versuchshütten wurden gleichzeitig mit Heu von vergleichbarem Vegetationszustand und gleichem Wassergehalt, aber verschiedener botanischer Zusammensetzung gefüllt.

Trotz des praktisch gleichen Wasserreichtums zeigten sich Unterschiede im Gärungsverlauf:

Der Naturheustock zeigte normale Gärung,
der Kleeheustock nahm eine Mittelstellung ein.

Die stärkere Gärung des Kleeheues zeigte sich in der erreichten Maximaltemperatur, in der längeren Auskühlungszeit und im höheren Trockensubstanzverlust.

Ein zur Zeit häufig diskutiertes mikrobiologisches Verfahren ist von GLATHE (1952) entwickelt worden: verdächtige Heuproben werden bakteriologisch untersucht.

Durch die Bestimmung des Feimgehaltes von Heuproben wird gezeigt, daß Mikroorganismen bei dem Erhitzungsprozeß eine Rolle spielen dürften. Den bei 50°C Bebrütungstemperatur gezüchteten Keimen wird besondere Bedeutung zugewiesen, denn damit kann der Beweis erbracht werden, daß diese Keime, deren Anzahl in frischem Gras und Heu etwa 2000-3000 g/kg Heu beträgt, bei höheren Temperaturen noch entwicklungsfähig sind.

Interessant sind die Ergebnisse einer Glathe'schen Braunheuuntersuchung:

Bebrütungstemperatur	Anzahl der Keime g/Heu
28°C	925 Millionen
37°C	895 "
50°C	1.155 "

Die Ergebnisse eines guten Heues (Bodentrocknung) ergeben völlig andere Werte:

Bebrütungstemperatur	Anzahl der Keime g/Heu
28°C	132,5 Millionen
37°C	6,6 "
50°C	0,002 "

Die thermophilen Bakterien sollen sich vor allem im Braunheu finden, da hier mit stärkerer biologischer Erhitzung bei fehlender Oxidation zu rechnen sei. An der Aussenseite des erhitzten Heustockes dürften Thermophile nur in gerin-

ger Anzahl vorhanden sein, während im Innern des Stockes (im Glutkessel und Verkohlungsbereich) die Mikroorganismen vernichtet werden.

SPECHT (1957), der sich besonders stark mit der chemischen Seite des Selbstentzündungsproblems befasst hat, sucht die Erklärung dieser Vorgänge (ab 80°C) in der Oxydation bakterieller Stoffwechselprodukte: in Kondensationsreaktionen, Polymerisationen, in den fortgeschrittenen Stadien der Erhitzung, in Zersetzung und Zerfall von Kohlehydraten und Eiweißkörpern (Decarboxylierung und Desaminierung) unter Bildung weiterer ungesättigter Stoffe, und in der Entstehung pyrophorer Kohle und Metallen, bzw. in der Freistellung katalytisch wirkender, feinstverteilter Metalloxyde (womöglich auch Carbonyle). Mit steigender Temperatur sollen die Reaktionen beschleunigt ablaufen. Sei der kritische Punkt überschritten (bei 100°C), der die völlige Austrocknung des Materials bedinge, führe der Prozeß (über Schwelung und Ausschwelung) zu einer Verkokung im Sinne einer trockenen Destillation

Die am Herd vorliegende pyrophore Kohle gewährleiste in sich überstürzender Reihenfolge den stark progressiven Fortgang stets exothermer Prozesse.

Entzündungsgefahr bestehe von 300°C aufwärts an. Infolge Autoxydation, durch pyrophore Metalle (Eisen/Mangan) oder feinstverteilt Metalloxyd katalysiert, komme es schließlich durch Zutritt von Luftsauerstoff zur Spontanentzündung am Kohlungsherd, die nicht selten explosionsartig verlaufe.

"Aber diese ausschließlich chemischen Reaktionen sind hinsichtlich ihrer Abläufe noch keineswegs befriedigend geklärt der Art."

Im Wesentlichen lassen sich bei allen hier aufgeführten Arbeiten drei Hauptrichtungen herausstellen:

Die Enzymtheorie,
die mikrobiologische und
die chemische Theorie.

Aber es ist bisher noch kein Versuch gemacht worden, der Lösung des Selbsterhitzungsproblems durch anatomische Untersuchungen näherzukommen.

Vertreter der einzelnen Richtungen versuchten zeitweise, allein ihre Theorie für den Selbsterhitzungsvorgang als ausschlaggebend anzusehen.

So wurde z.B. von Boekhout und de Vries allein der chemische Ablauf in den Vordergrund gestellt, und jede Beteiligung von Mikroorganismen bestritten, die nach Mische für die Wärmesteigerung in den unteren Temperaturbereichen verantwortlich sind. Die Enzymtheorie, der nach Hüne größere Bedeutung im Ablauf des Selbsterhitzungsprozesses zugeschrieben wird, ist 1893 bereits von Berthelot erwähnt, und 1918 von Tschirch in den Vordergrund gestellt worden, der hinwiederum der Tätigkeit der Mikroorganismen keinerlei entscheidende Bedeutung beimisst.

Durch die Untersuchungen von Glathe dürfte heute bestätigt sein, daß mikrobiologische Vorgänge mit die Ursache des ersten Temperaturanstieges im Heustock sind. Ob und inwieweit Fermentsysteme den Vorgang unterstützen, ist noch nicht eindeutig geklärt.

Die heutige Auffassung geht dahin, daß die eben beschriebene mikrobiologische Phase bei ca 80°C von einer chemischen abgelöst werden muß, die dann die Steigerung der Temperatur bis zum Entzündungspunkt übernimmt (Hildebrand, Hüne, Mische, Specht).

III. Anatomischer Teil

Bei vergleichender Betrachtung aller bisher durchgeführten Arbeiten fällt auf, dass der Mikromorphologie keine nennenswerte Beachtung geschenkt wurde.

In einem Pflanzenmaterial aber, das so erhebliche Einflüsse überstehen muss, sind Veränderungen zu erwarten, die mikroskopisch erfassbar sein müssten. Es galt also, entsprechendes Heu zu beschaffen, welches a) eine Selbsterhitzung erlitt und b) aus einem Stock kam, der sich tatsächlich infolge der Selbsterhitzung entzündete und nicht etwa einer Brandstiftung zum Opfer fiel.

Aus diesen Gründen wurden in den Versuchsreihen mit selbst-entzündetem Material nur solche Proben zur mikroskopischen Untersuchung herangezogen, die aus Heustöcken stammten, welche sich gemäss kriminalpolizeilicher Ermittlung selbst entzündet hatten.

Für die Behandlung und Aufbewahrung dieses Materials (Brandheu) ergab sich nach eingehenden Versuchen mit stufenweise 20-60%igem Alkohol und offener Aufbewahrung an der Luft, dass die letztere für das Material am günstigsten ist. Um es für besondere Zwecke noch schneidefähiger zu machen, kann es ca. 24 - 36 Stunden in 40%igen Alkohol eingelegt werden, ohne dass anatomische Veränderungen zu bemerken sind.

Von den im Heu vorhandenen Gramineen-Teilen: Blüten, Stengel, Blätter, fallen die Blüten für eine botanische Untersuchung meist aus, da sie fast immer teilweise oder völlig zerstört sind. Da die Stengel durch ihre, oft schon starke Verholzung vielleicht nicht die vielen Möglichkeiten anatomischer Veränderungen bieten, wurde hier mit der Betrachtung der Blätter begonnen.

Aus der Familie der Gramineen wurde nur die Gruppe der Futtergräser herausgegriffen; einmal, weil sie der Hauptbestandteil aller Heuproben sein dürften, und zum anderen, um das Arbeitsgebiet etwas einzuschränken.

1. Frisches Material

Um vergleichende Bilder vom Bau normaler Gramineenblätter bereit zu haben, wurden zunächst die wichtigsten Futtergräser im frischen Zustand geschnitten (Blattquerschnitte). Von mehreren Präparaten werden Mikrofotos wiedergegeben (Abb. 1 - 7).

Übereinstimmend lassen sich folgende Tatsachen festhalten:

Die Epidermis ist stets vollständig, unbeschädigt und nicht deformiert.

Das Parenchym ist unbeschädigt und zeigt keine Zerreißungsräume.

Die Leitbündel sind vollständig. Weder Siebteil noch Gefäßteil sind in irgendeiner Weise beschädigt.

Abweichende Verfärbungen sind nicht feststellbar.

Die Zellinhaltsstoffe sind deutlich zu erkennen (Abb. 6 und 7).

Das für die Mikrofotos verwendete Material wurde am Untersuchungstage frisch gepflückt, und sofort untersucht. Die einzelnen Grasarten befanden sich im annähernd gleichen Vegetationszustand. Die Schnitte wurden alle jeweils durch etwa die Blattmitte geführt.

Hier sollen die Versuchsergebnisse von *Dactylis glomerata* aufgeführt werden:

a) *Dactylis glomerata* wurde von einer halbbeschatteten Wiese gepflückt und sofort untersucht.

Das Aussehen des Materials: Bei den Blättern überwog noch die grüne Farbe, nur am Rand zeigten sich einige sehr schmale gelbliche Stellen.

Bei der mikroskopischen Untersuchung der Blattquerschnitte ergab sich folgendes:

Das Blattgewebe war überall vollständig. Irgendwelche Veränderungen oder Abbauerscheinungen waren weder in der Epidermis, noch in den Leitbündeln, noch im übrigen Blattgewebe zu bemerken.

Auffallende Verfärbungen zeigten sich nicht. Der ganze Schnitt, einschliesslich der besonderen Gewebepartien, wie auch der sklerenchymatischen Zellen, besass eine einheitliche helle Färbung. Die Zellinhaltsstoffe waren deutlich zu erkennen (Abb. 6).

b) Pflanzenmaterial vom selben Standort:

Unterschiede zur Versuchsreihe a) bestanden darin, dass sich die Blätter bereits völlig gelbbraun verfärbt hatten, also offensichtlich Abbauerscheinungen eingetreten waren.

Gegenüber dem grünen Blatt ergaben sich, mikroskopisch gesehen, folgende Unterschiede:

Der Blattquerschnitt hatte ein leicht gelblichbraune Verfärbung, die beim Liegen in Glyzerin zuerst etwas heller wurde, aber nicht völlig verschwand. Die Leitbündel, besonders der Siebteil, waren nicht angegriffen. Das Mesophyll zeigte starke Zerstörungen; zum Teil waren an diesen Stellen auch keine Reste der Zellwände mehr vorhanden. Daraus, und aus der Unbeschädigtheit der Epidermis geht hervor, dass es sich nicht um Zerreiassungen durch das Schneiden handeln kann, sondern hier natürliche Abbauerscheinungen des Blattes vorliegen. Auch an dickeren Schnitten, wo mit einer Zerreiassung des Blattgewebes beim Schneiden nicht in allen Schichten zu rechnen ist, konnten die gleichen Abbauerscheinungen nachgewiesen werden.

Auf diese Zerstörungen, die über die ganze Blattspreite im Mesophyll mehr oder minder gleichmässig verteilt sind, wird in der folgenden Versuchsreihe mit normalem Heu näher eingegangen.

2. Normales Heu

Die Proben für diese Versuchsreihen wurden allgemein solchem Heu entnommen, das unter natürlichen Bedingungen getrocknet worden war. Das Material stammte zum Teil aus Stöcken, zum Teil wurde auch Heu verwendet, das noch ausgebreitet auf der Wiese lag.

Das Material war völlig trocken und wurde auch in diesem Zustand geschnitten, ohne vorher mit Alkohol behandelt worden zu sein.

Die verwendeten Gramineenblätter zeigten im allgemeinen eine grünlich-gelbliche Verfärbung. Ebenso war im mikroskopischen Bild der Blattquerschnitte eine gelblich-grüne Verfärbung der Zellinhaltsstoffe zu erkennen.

Hervorzuheben ist, dass in dem normalen Heu dieselbe Erscheinung zu beobachten ist, auf die unter 1b bereits hingewiesen wurde: Zellauflösungen des Parenchymgewebes zwischen den Leitbündeln, so dass es zu einer Ausbildung erhalten gebliebener Parenchymbrücken im Blattgewebe kommt. Die sklerenchymatischen Teile des Blattgefüges werden von den Auflösungserscheinungen nicht betroffen; die Leitbündel sind völlig unbeschädigt und weisen keine Verfärbungen auf.

Diese Auflösungsvorgänge, die zu Hohlräumen im Blattgefüge führen, sind sowohl bei natürlich getrocknetem Heu (nur in den gelb verfärbten Blättern), wie auch in den bereits völlig gelb verfärbten Blättern des noch am Standort befindlichen Materials vorhanden.

Das Entstehen dieser "Zerreissungsräume" kann man sich auf verschiedene Weise erklären.

Einmal muss ein ganz mechanisches Zerreissen der zarten Gewebepartien beim Herstellen der Mikroschnitte in Erwägung gezogen werden. Welche Bedeutung dieser Möglichkeit zukommt, wurde bereits erläutert. Vorausgesetzt, dass die offenen Hohlräume im Mesophyll je nach Fortschritt des Abbaues bereits vorhanden sind, kann durch die Führung der Mikroschnitte lediglich noch eine Erweiterung des Raumes und ein Verschieben der Zellen eintreten. Wie an späterer Stelle noch gezeigt wird, können bereits vorhandene Räume bei plötzlicher hoher Einwirkung von Hitze und kurzfristig steilem Temperaturanstieg vermutlich durch starkes Austrocknen unnatürliche Veränderungen erfahren. Diese sind mikroskopisch erfassbar. Aber ein echtes Entstehen von Hohlräumen auf diesem künstlichen Wege mit Hilfe von Hitze ist nicht beobachtet worden und dürfte nach den hier gesammelten Erfahrungen ausscheiden.

Schrittweise wurde vom Entstehen des kleinsten Hohlraumes bis zum grössten die Entwicklung am jeweils vorliegenden Material mikroskopisch verfolgt. Aber da es sich hier um verschiedenstes Gräsermaterial handelt, lässt sich kein exakter Beweis führen.

Mikrophotos zu dieser Versuchsreihe : Abb. 8 bis 11.

3. Selbstentzündetes Material

Das Material zu den folgenden Untersuchungen stammt aus Proben des Landeskriminalamtes München, bei denen die Selbstentzündung des Heues durch die Brandsachverständigen dieses Amtes nachgewiesen war.

Brandheu nach seiner botanischen Zusammensetzung zu beurteilen, ist ausserordentlich schwierig, da es bei der Bestimmung der Gramineen vorwiegend auf die Blüten ankommt, und diese hier immer fast völlig vernichtet sind. Trotzdem ist wiederholt der Versuch gemacht worden, Heuselbstentzündungsproben auf ihre botanische Zusammensetzung zu untersuchen. Eine Bestimmung der Grasarten im Bereich der starken Erhitzung (um den Glutkessel) war jedoch nie möglich, da auch das allgemeine Blattgefüge zu starke Veränderungen aufweist.

Wenn in dem Material eines selbsterhitzten Heustockes anatomische Veränderungen auftreten, dürften sie am ehesten in den höheren Temperaturbereichen zu erwarten sein. Für die Untersuchungen in dieser Richtung wurde deshalb vor allem Material herangezogen, das sich in unmittelbarer Nähe vom Brandherd befand, aber noch nicht so stark verkohlt war, dass es beim Schneiden zerbröckelte. Die verwendeten Gramineenblätter zeigten eine mittel- bis dunkelbraune Farbe. Aus den oben erwähnten Gründen musste auf eine Art-

bestimmung verzichtet werden.

Das mikroskopische Bild der Blattquerschnitte zeigte die gleichen Abbauerscheinungen, die bereits in den Versuchsreihen mit frischem Gras und normalem Heu erwähnt und beschrieben wurden. Die Leitbündel sind völlig erhalten und weisen keine abweichenden Verfärbungen auf.

Bei allen diesen Proben ist aber eine auffällige Erscheinung zu beobachten:

Die Innenseite der Epidermiszellen scheint stellenweise stark verdickt. Diese knötchenartigen Verdickungen entstehen jedoch durch ein Kollabieren der Zellwände der an die Epidermis angrenzenden Zellschichten. Die Erscheinung tritt immer nur auf der morphologischen Blattunterseite auf. In Abb. 13 und 14 ist das Anfangsstadium dieses Kollabierens der Zellwände im Mikrofotofestgehalten worden. (Erläuternde Skizzen siehe Abb. 15 und 16).

Der Beginn dieser vermutlich rein mechanischen Deformation ist in diesem Präparat direkt unterhalb des Hauptleitbündels, kann aber auch an anderen Stellen der Epidermis auftreten. Das allmähliche Zusammenfallen der Zellwände, was schliesslich zu einem vollkommenen Kollabieren führt, ist auf der Ausschnittsvergrößerung (Abb. 14) sehr deutlich zu erkennen.

Ist dieser Vorgang abgeschlossen (Abb. 17 und 18), so führt er schliesslich an der Epidermis-Innenwand zu einer charakteristischen knötchenartigen Schichtung bzw. Verdickung.

Mitten im Glutkessel eines Heustockes, der sich in starker Selbsterhitzung befindet, spielen sich ohne Zweifel diese Vorgänge der Zersetzung des Pflanzenmaterials äusserst stürmisch ab.

In drei Fällen gelang es im augenblicklichen Zeitraum Heubestandteile unmittelbar vom Glutkessel her der Mikroskopie zuzuführen. Eine exakte botanische Bestimmung der weitgehend zerstörten Pflanzenreste war nicht mehr möglich, da das Heu äusserst stark verkohlt war.

Aus diesem Material wurden Teile von Gramineenblättern herausgenommen, die sich im gerade noch schneidefähigen Zustand befanden. Aussehen des Materials: graubraun, ziemlich dunkel, stellenweise schwarz.

Auch in diesen Proben konnte die Erscheinung des Kollabierens

der Zellwände festgestellt werden.

Dieses Merkmal darf als Charakteristikum für Heu angesehen werden, das aus einer echten Selbstentzündung stammt, und dabei erheblichen Temperaturen ausgesetzt war. Weder im frischen Material, noch im normal getrockneten Heu, noch in künstlich erhitzten Proben konnte eine ähnliche Erscheinung beobachtet werden.

4. Künstlich erhitztes Material

Zu dieser Versuchsreihe wurde Heu herangezogen, das unter natürlichen Bedingungen getrocknet worden war. Um Vergleichsmöglichkeiten zu den Ergebnissen der echten Selbstentzündung zu haben, wurde versucht, dieses Material mit Labormethoden künstlich zu erhitzen. Bei ganz schwacher Gasflamme wurde ein Blatt-Teil vorsichtig unter ständigem Hin- und Herwenden auf einem Asbestnetz angeröstet, bis die äussere Farbe des Blattes der Färbung des selbst erhitzten Materials annähernd gleichkam. Das so vorpräparierte Blatt wurde nun sofort quer geschnitten, ohne vorher mit Alkohol behandelt zu sein, um keinerlei Veränderungen eintreten zu lassen. Das mikroskopische Bild des Blattquerschnitts zeigte ebenfalls die schon bekannten natürlichen Abbauerscheinungen des Grases in Form von Zellauflösungen, die zur Hohlraumbildung und zum Entstehen von Parenchymbrücken führen.

Auch hier treten zwei spezifischen Merkmale in Erscheinung, die nur in dieser Versuchsreihe gefunden wurden:

- a) In den Partien unter der Epidermis tritt erstmals eine starke Dunkelbraun- bis Schwarzfärbung auf, die Zellinhaltsstoffe erscheinen dunkel. Diese abweichende Verfärbung erstreckt sich auch auf die Leitbündel.

Von einigen künstlich erhitzten Proben werden Mikrofotos wieder gegeben (Abb. 19 bis 25). Es sind keine Idealpräparate herausgegriffen worden; die Ausschnitte sind allgemein gültig für Material, das auf die beschriebene Weise künstlich erhitzt wurde. In der starken Vergrößerung (Abb. 25) ist die dunkle Verfärbung bestimmter Zellpartien sehr deutlich.

Ganz allgemein lässt sich zu dieser Erscheinung sagen, dass eine Verfärbung, besonders der verholzten Zellwände in Richtung braun bis schwarz auf hohe Hitzegrade hindeutet.

b) Die zweite auffällige Erscheinung dieser Versuchsreihe ist eine fortschreitende Vorwölbung der Epidermis-Zellen. Auf Abb. 26 ist das Anfangsstadium dieser Vorwölbung zu sehen. Abb. 27 zeigt, dass die ganze Epidermis-Zelle sich zapfenartig vorgeschoben hat.

Ob diese Erscheinung immer auf die hohen Hitzegrade zurückzuführen ist, lässt sich nicht mit Bestimmtheit sagen. Sie wurde aber ausschliesslich bei künstlich erhitztem Material festgestellt, so dass der Schluss nahe liegt, dass es sich hier ebenfalls um die Einwirkung hoher Temperaturen handeln könnte.

Die Blätter der Gramineen weisen in ihrer anatomischen Struktur eine Reihe von Besonderheiten auf. Im Verlauf der Untersuchungen schob sich immer wieder der Gedanke in den Vordergrund, ob nicht noch andere Stellen des Blattes ganz besonders typische Veränderungen zeigen, die bei frischen Blättern einerseits, und selbsterhitzten andererseits als Erkennungsmerkmale für den Erhitzungsprozess herangezogen werden könnten.

Aus den gesamten Untersuchungen in dieser Richtung blieben noch die Zellpartien um die Gelenkzellen (Abb. 28). Man könnte annehmen, dass gerade hier Angriffsstellen von aussen her auf das Blatt gegeben wären.

Aber in keiner der Versuchsreihen zeigten sich irgendwelche Ansatzpunkte für besondere Merkmale oder Veränderungen dieser Zellpartien.

Erklärungen der Abbildungen des Anatomischen Teiles

Bei allen abgebildeten Mikrophotos und Zeichnungen handelt es sich immer um Blattquerschnitte.

Frisches Material:

- Abb. 1 : *Dactylis glomerata* (Übersicht)
- Abb. 2 : *Trisetum flavescens* (Übersicht)
- Abb. 3 : *Poa trivialis*
- Abb. 4 : *Festuca ovina*
- Abb. 5 : *Deschampsia caespitosa*
- Abb. 6 : Zellinhaltsstoffe deutlich zu erkennen
- Abb. 7 : Zellinhaltsstoffe deutlich zu erkennen

Normales Heu

- Abb. 8 : Die natürlichen Abbauerscheinungen führen zu Zellauflösungen im Blattgewebe; dadurch wird die Ausbildung regelrechter Parenchymbrücken bedingt, die aus dichtem Gewebe bestehen
- Abb. 9 : Die Auflösung der Zellwände am Rande des Hohlraumes ist deutlich zu erkennen.

Heu aus Selbstentzündungsproben

- Abb. 10 : Dieses Blatt wurde herausgegriffen, weil es in seine Blattstruktur (ausser Behaarung) Abb. 8 sehr ähnlich ist. Es stammt aus einer Selbstentzündungsprobe, aber nicht direkt vom Glutkessel, sondern von den äusseren Partien des Stockes, wo noch annähernd normale Temperaturen herrschen. Auch hier sind die Abbauerscheinungen deutlich zu erkennen, wenn auch noch nicht in einem so fortgeschrittenen Stadium wie bei Abb. 8.
- Abb. 11 : *Dactylis glomerata* : hier ist deutlich der Beginn der Abbauerscheinungen zu erkennen (vergl. Abb. 1)
- Abb. 13 : Deutlich sind hier die kollabierten Zellwände im Anfangsstadium (unter dem Hauptleitbündel) zu erkennen. Ausserdem sind auf diesem Übersichtsbild die natürlichen Abbauerscheinungen des Gramineenblattes zu sehen
- Abb. 14 : Ausschnittsvergrößerung der Abb. 13
- Abb. 15 : Diese beiden Zeichnungen wurden als Ergänzung der Mikro- und 16 : photos 13 und 14 angefertigt. Sie sollen das Anfangsstadium des Kollabierens der Zellwände verdeutlichen.

Abb. 17 : Diese Abbildung zeigt das Endstadium des Kollabierens der Zellwände. Der Eindruck der "knötchenartigen Verdickung" wird hier deutlich.

Abb. 18 : Ergänzende Zeichnung zu Abb. 17

Normales Heu, künstlich erhitzt

Abb. 19 : Bei dem künstlich erhitzten Material fällt eine sehr starke Schwarzfärbung, besonders in den Partien unter der Epidermis auf, die sonst nirgends zu bemerken ist. Die Zellinhaltsstoffe sind dunkel verfärbt. Auch hier sind Zellauflösungen, wie bei den natürlichen Abbauerscheinungen im normalen Heu, zu bemerken. Es entsteht jedoch der Eindruck, dass diese Stellen durch die plötzliche Erhitzung mehr auf unnatürliches Zerreißen, Zerplatzen zurückzuführen sind

Abb. 21 : Durch die Schrumpfung des gesamten Blattgefüges ist der Querschnitt schmaler geworden, während die Epidermis ausserdem zu Auftreibungen neigt.

Abb. 22 : Die Schwarzfärbung bestimmter Zellpartien bei künstlicher Erhitzung ist auf hohe Temperaturen zurückzuführen

Abb. 23 : Wie Abb. 22

Abb. 24 : Wie 22 und 23

Abb. 25 : Bei dieser Ausschnittsvergrößerung ist deutlich zu erkennen, dass die Zellpartien unterhalb der Epidermis und neben dem Leitbündel besonders starke Schwarzfärbung zeigen. Ausserdem tritt hier ein weiteres spezifisches Merkmal besonders in Erscheinung: ein Vorwölben der Epidermiszellen

Abb. 26

und 27 : Diese charakteristische Vorwölbung der Epidermiszellen war nur bei künstlich erhitztem Material zu beobachten. Abb. 26 zeigt diese Erscheinung im Anfangsstadium, auf Abb. 23 ist die ganze Epidermiszelle zu einem Zapfen vorgeschoben.

Frisches Material

Abb. 28 : Gelenkzellen

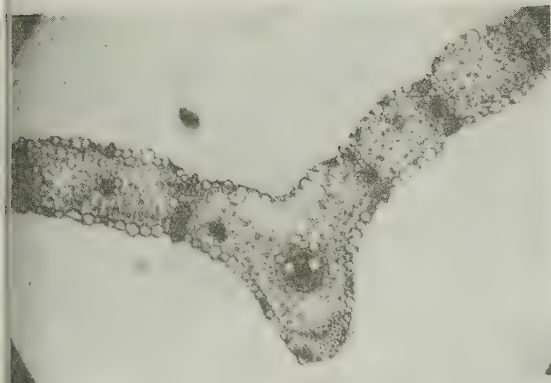


Abb. 1

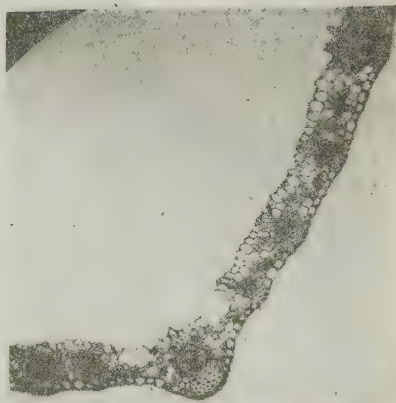


Abb. 3

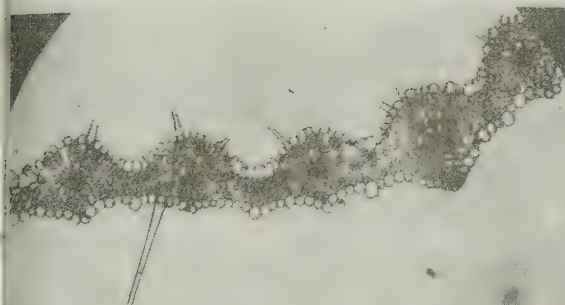


Abb. 2



Abb. 4

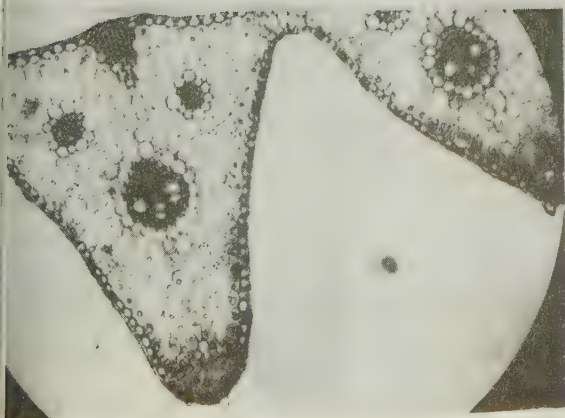


Abb. 5

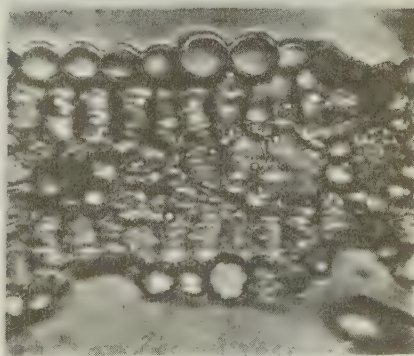


Abb. 6

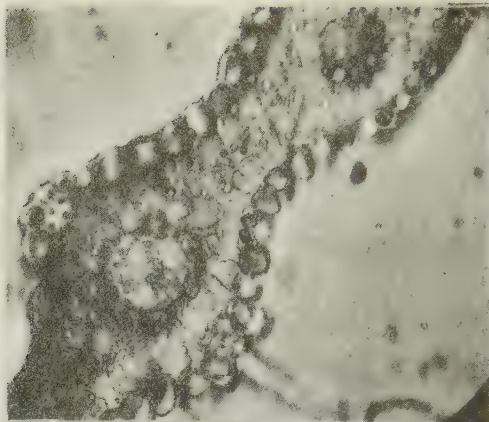


Abb. 7

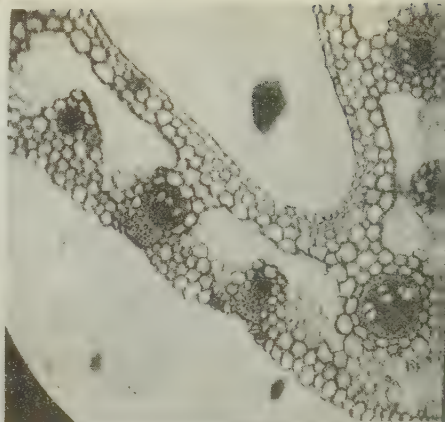


Abb.

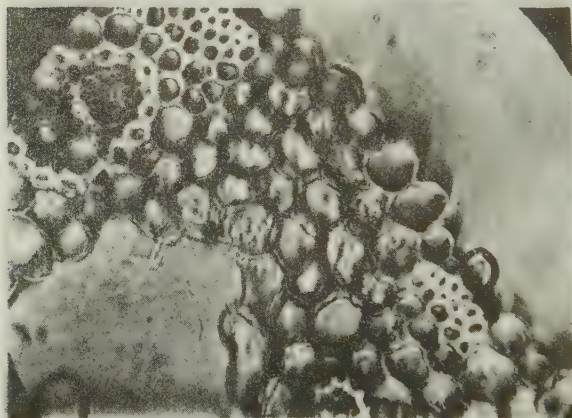


Abb. 9

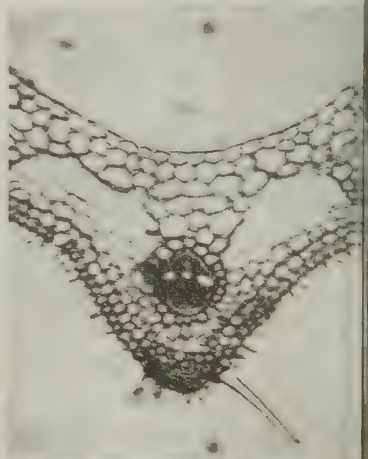


Abb.

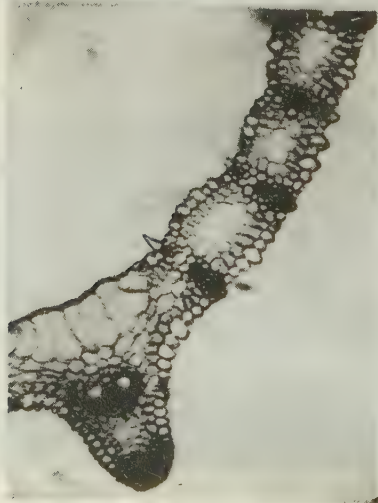


Abb. 11



Abb.

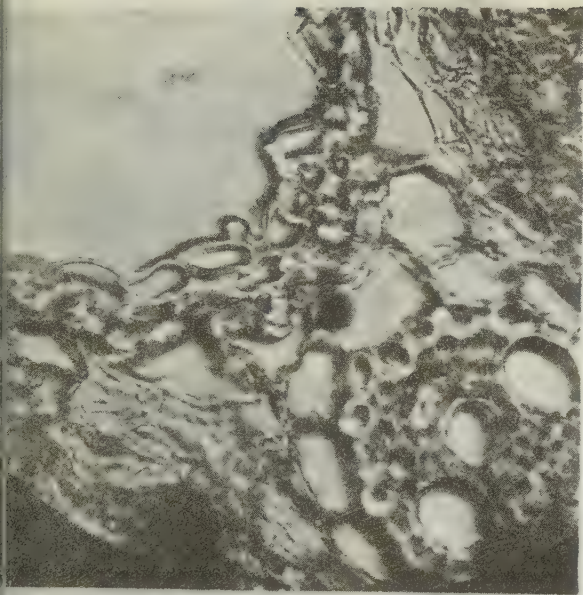


Abb. 14

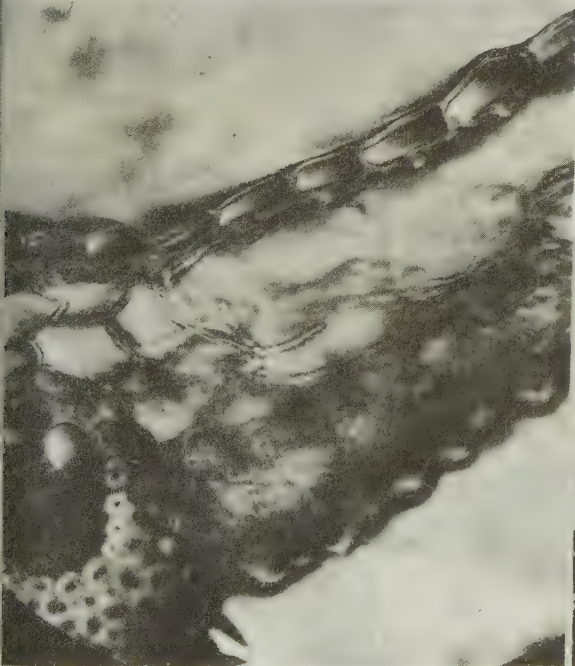


Abb. 17

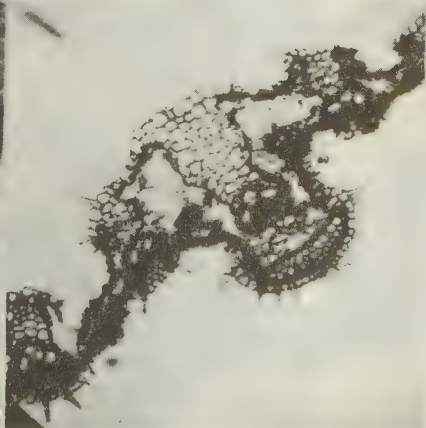


Abb. 19

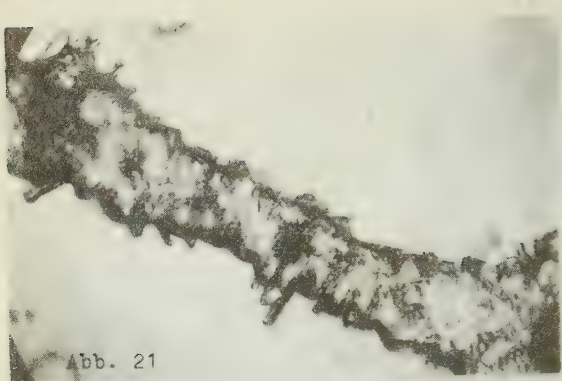


Abb. 21

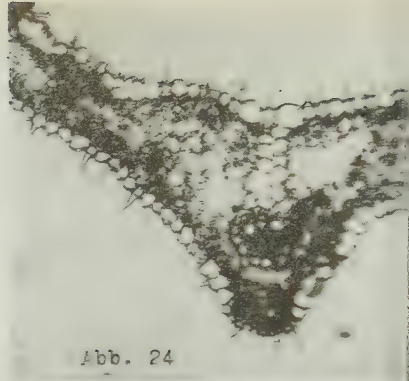


Abb. 24



Abb. 22

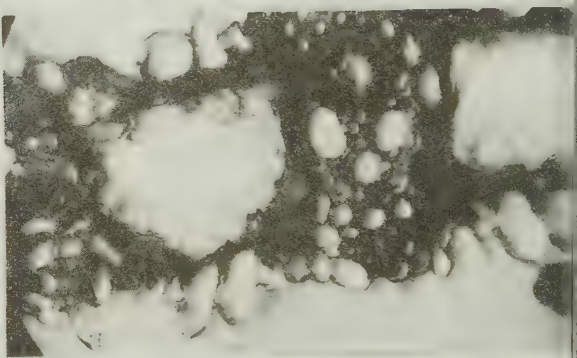


Abb. 2

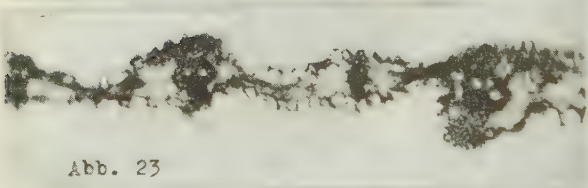


Abb. 23

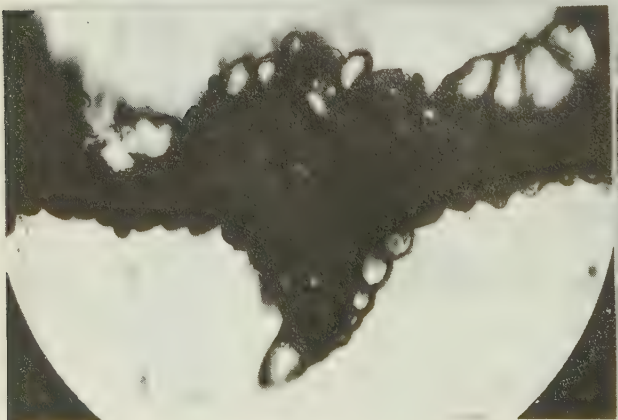


Abb. 26

Abb.

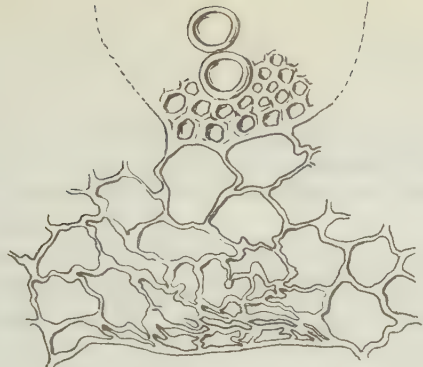


Abb. 15

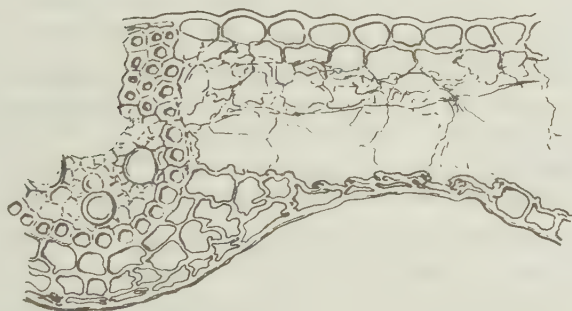


Abb. 16



Abb. 18

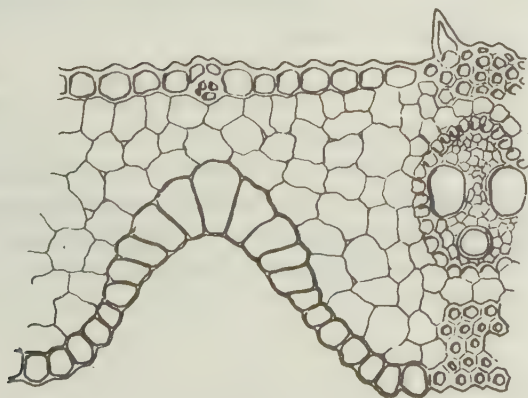


Abb. 28

VI. Selbsterhitzungsversuche in Dewar-Gefässen

In diesen Versuchen sollten folgende Fragen geklärt werden:

Inwieweit ist Gras verschiedenen Wassergehaltes in der Lage, sich selbst zu erwärmen, und welche Temperaturen werden dabei erreicht ?

Welche Gase treten in den unteren Temperaturbereichen auf ?

Die Prüfung wurde für folgende Gase vorgenommen:

Kohlendioxyd

Da es sich meist um frisches Material handelte, war mit dem Auftreten von CO_2 aus der Atmung unbedingt zu rechnen.

Ammoniak

war als Eiweissabbauprodukt zu erwarten.

Kohlenmonoxyd und Schwefelwasserstoff

waren nach NOLZ (1926) in stark überhitzten Heustöcken nachgewiesen worden. Hier sollte geprüft werden, ob ihr Auftreten in den unteren Temperaturbereichen möglich ist, um durch den eventuellen Nachweis bisher unbekannte Reaktionsabläufe zu klären.

VERSUCHSANORDNUNG

Alle Versuche wurden in Dewargefässen durchgeführt. Die Inhaltsangabe (0,5 - 1,5 l) erfolgt jeweils bei der Beschreibung der einzelnen Versuche.

Die Isolierung der Gefässe nach aussen erfolgte durch eine dicke Schicht Glaswolle; oben wurden sie mit einem Stopfen, ebenfalls aus Glaswolle, verschlossen.

Das verwendete Versuchsmaterial war meist frisches Wiesengras (Wassergehaltsangaben bei den einzelnen Versuchen).

Um eine dichte und möglichst immer gleichmässige Packung des Materials in den Gefässen zu erzielen, wurde das Gras vorher in kurze, 2 - 4 cm lange Stücke zerschnitten.

Die Temperaturmessung erfolgte mittels eines Eisen-Konstantan-Thermoelementes. Die Einführung des Probes wurde durch ein dünnwandiges Glasröhrchen ermöglicht, welches in das Material eingebettet war.

Die Gasmessung erfolgte mit einem Dräger- Gasspürgerät.

Es besteht im wesentlichen aus einer Balgpumpe, die ein definiertes Luftvolumen (ca 100 ccm/Hub) mit reproduzierbarer Geschwindigkeit durch ein Prüfröhrchen saugt.

Die Prüfröhrchen enthalten genau abgestimmte Mengen von Reagenzien, die auf das jeweils zu messende Gas weitgehend spezifisch ansprechen.

Das Farbbild des Prüfröhrchens und die Anzahl der Saugzüge ergeben zusammen ein direktes Maß für die Konzentration des vorliegenden Gases.

Das Absaugen aus dem Dewargefäß erfolgte durch ein zweites, in das Material eingebautes Glasröhrchen, das mittels eines kurzen Schlauchstückes an das Prüfröhrchen angeschlossen werden konnte.

Einfluss des Wassergehaltes auf die Selbsterwärmung

In den ersten beiden Versuchen war zu prüfen, ob der Temperaturanstieg vom Wassergehalt abhängig ist.

Versuch 1

Es wurden Dewargefäße von 0,5 l Inhalt verwendet.

Das Material war frisches Wiesen gras, vor dem ersten Schnitt.

Der Wassergehalt betrug bei Versuch

1 = 81,5%

2 = 79,4%

3 = 78,04

In jedem dieser Versuche wurden gleichlaufend zwei Parallelversuche angesetzt.

In Tafel 1 sind die Temperaturkurven dieser drei Versuche eingezeichnet, und zwar wurde aus drei Parallelversuchen jeweils der Mittelwert genommen.

Durch die annähernd gleichen Wassergehalte und die gleiche Anordnung und Isolierung der Gefässe wurde versucht, gleiche Bedingungen für alle Versuche zu schaffen.

Die Höchsttemperatur lag bei:

1a und 1b am Ende des 3. Tages, bei

1c am Ende des 4. Tages.

Der höchste Wert, der erreicht wurde, war 45°C (1a).

Versuch 2

Der gleiche Versuch wurde mit neuem Material vom gleichen Standort wiederholt, dessen Wassergehalt durch 30-stündiges Trocknen an der Luft auf

35,9% bei 2a, und

34,7% bei 2b herabgesetzt war.

Es wurden jeweils zwei Parallelversuche angesetzt (Tafel 2).

Es ist hier ein viel langsames Ansteigen der Temperatur zu verzeichnen.

Die Höchstwerte liegen bei

2a etwa am 3. Tag,

2b etwa am 5. Tag.

Der erreichte Maximalwert ist 32°C (2b).

Aus den Ergebnissen der Versuche 1 und 2 kann man mit Sicherheit schliessen, daß die Höhe der erreichten Temperatur bei der Selbsterwärmung von Gras auch vom Wassergehalt abhängig sein muss.

Eine Bestätigung dieser Annahme findet sich in der Arbeit von HÜNI (1926), in der durch Großversuche bestätigt wurde, daß der Wassergehalt des Dürrfutters, neben anderen Faktoren, von größtem Einfluss auf den Gärungsverlauf ist. Genügend getrocknetes Dürrfutter hatte in keinem Fall eine anormale Gärung durchgemacht.

Selbsterwärmung in Dewargefäßen (1/21-Inhalt)

Tafel 2

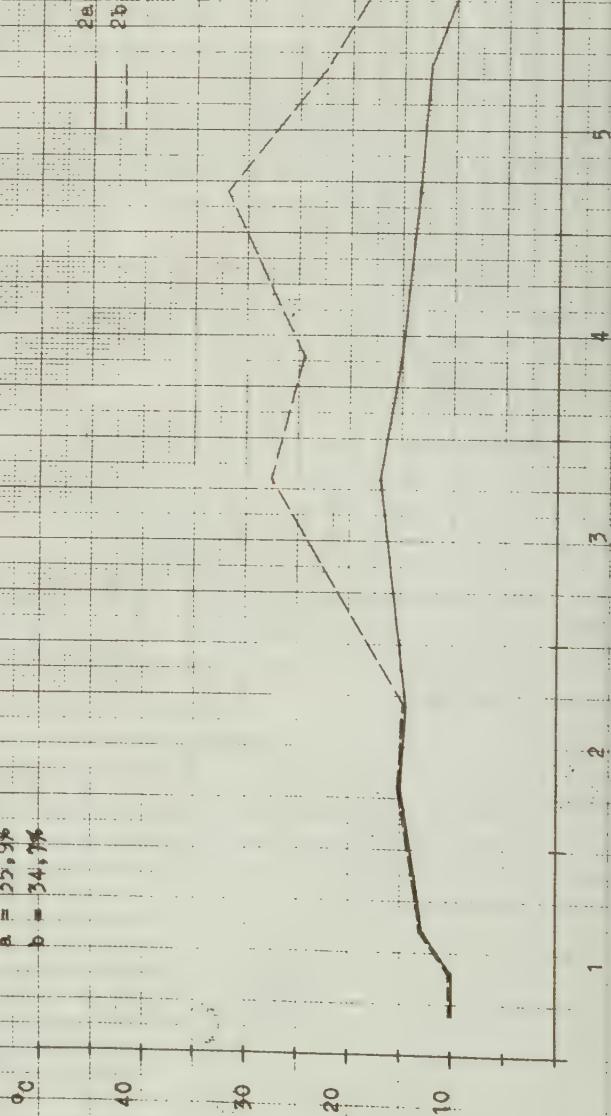
Versuch 2a, b

Material : frisches Gras, 30 Std. an der Luft getrocknet

Wassergehalt :

a = 35,9%

b = 34,7%



Einfluß der Düngung auf die Selbsterwärmung

Untersuchungen von KNITTEL (1923) hatten ergeben, daß Heu aus der Herbstdüngung brandgefährlicher ist, als Heu aus der Frühjahrsdüngung. Um diese Feststellungen zu bestätigen, wurden chemische Untersuchungen durchgeführt, die ergaben, daß Heu aus der Frühjahrsdüngung (Stallmist) 4,4% Eisengehalt aufwies, Heu aus der Herbstdüngung - bei gleichem Boden und gleichem Samen - 7,74. Daraus wurde geschlossen, daß der im Boden vorhandene Eisengehalt, der bei der Herbstdüngung in einem wesentlich größeren Umfang von der Pflanze aufgenommen wird, bei der Selbsterhitzung pflanzlichen Materials eine Rolle spielen könnte. Bis jetzt ist aber der Einfluß des Mineralstoffgehaltes von Wiesenfutter auf die Übergärungs- und Überhitzungsbereitschaft des Dürrfutters noch weitgehend unbekannt. Man vermutet, daß es sich um Katalysatorwirkungen handelt.

Versuch 3

In diesem Versuch sollte geprüft werden, ob die Düngung (hier mit $MnSO_4$) einen Einfluß auf die Selbsterwärmung haben kann.

Zu diesem Zweck wurde *Dactylis glomerata* (Keimfähigkeit 94%) in Mitscherlich-Kulturgefäßen in Mn-freiem Sand ausgesät.

Es wurden drei verschiedene Düngungen vorgenommen:

3a Düngung mit $MnSO_4$

entsprechend einer Menge von 120 kg/ha (Norm im landwirtschaftlichen Betrieb = 40 kg/ha)

3b Düngung mit $MnSO_4$

entsprechend einer Menge von 60 kg/ha

3c keine Düngung.

Für jede Düngungsstufe wurden drei Gefäße angesetzt. Das Gießen erfolgte mit Knop'scher Nährlösung.

Es zeigten sich keine Wachstumsunterschiede bei den drei Ansätzen.

Nach 58 Tagen wurde das an den Spitzen bereits gelblich verfärbte Material geschnitten, die Menge von jeweils drei Kulturgefäßen gleicher Düngung in ein Bewargefäß (0,5 l Inhalt) gebracht, und nach der üblichen Versuchsanordnung zur Selbsterwärmung angesetzt.

Zusätzlich wurde in jedes Gefäß ein zweites Glasröhrchen eingebaut, um die gleichzeitige Gasmessung mit einem Dräger-Gerät zu ermöglichen.

Ergebnisse:

3a Wassergehalt = 82,1%

MnSO_4 = 120 kg/ha

Maximaltemp. = 35°C am 8. Tag

3b Wassergehalt = 81,5%

MnSO_4 = 60 kg/ha

Temperaturmessung wurde am 4. Tag zugunsten der Gasprüfung auf CO eingestellt.

Temperaturkurven zu 3a und 3b auf Tafel 3.

3c Wassergehalt = 82,5%

Düngung keine

Maximaltemp. = 35°C am 8. Tag.

Temperaturkurve hierzu auf Tafel 4.

Das Gras wurde nach Beendigung des Versuches verascht, und spektralanalytisch auf Mangan geprüft.

Bei 3c wurden geringe Spuren von Mangan festgestellt, bei 3b und 3a stieg der Mn-Gehalt entsprechend der Zugabe des Düngemittels.

Obwohl der Temperaturverlauf von 3b zugunsten der Gasmessung nicht mehr weiter verfolgt werden konnte, kann man anhand der Kurvenvergleiche von 3a und 3b sagen, daß in diesen niedrigen Temperaturbereichen der Mn-Düngung offenbar noch keine entscheidende Rolle zukommt, denn die beiden Kurven verlaufen annähernd gleichmäßig; bei beiden liegt das Temperaturmaximum bei 35°C am 8. Tag.

Tafel 2

Selbsterwärmung in Dewargefäßen (1/2l-Inhalt)

Versuch Nr. b

Material : frisches Gras

Wassergehalt :

a = 82,1%

b = 81,5%

Düngung : mit MnSO_4 , entsprechend einer Menge von

a = 120 mg/ha

b = 60 mg/ha

°C

40

30

20

10

3a

3b

1

2

3

4

5

6

7

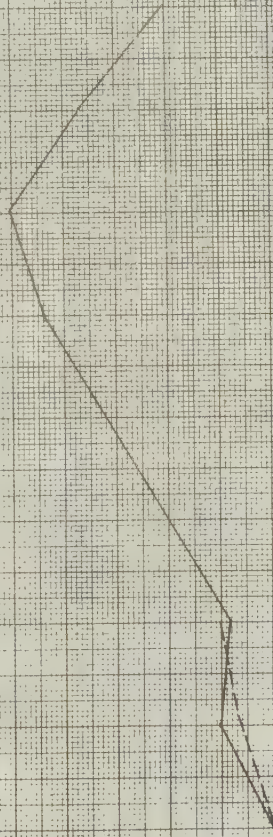
8

9

10

11

Zeit (in Tagen)



Selbsterwärmung in Dewargefäßen (1/2l.-Inhalt)

Tafel 4

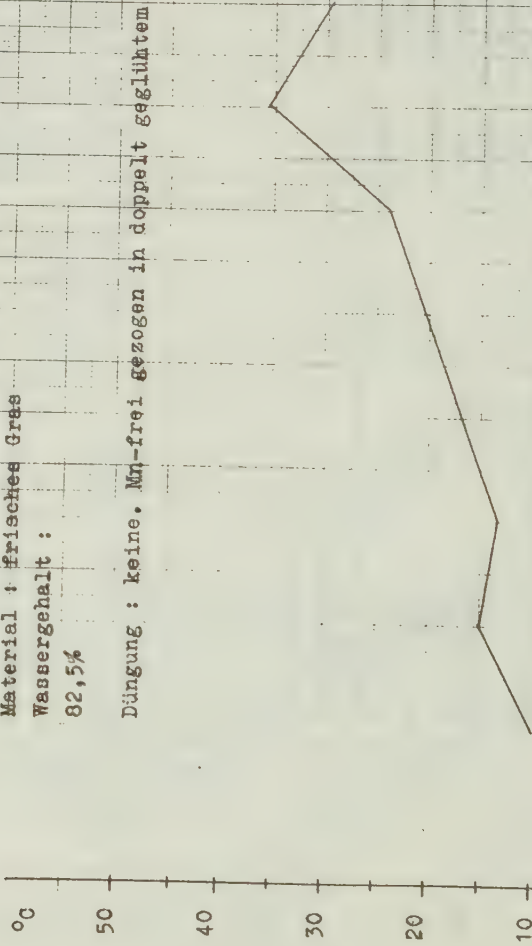
Versuch 3c

Material : Frisches Gras

Wassergehalt :

82,5%

Düngung : keine. Mn-frei gezogen in doppelt gegläutem Sand



Für eine präzise Angabe über den Einfluss der Düngung - vor allem der Spurenelemente - wäre aber eine umfassendere Untersuchung mit den verschiedensten Düngemitteln notwendig.

Diese Untersuchung würde indessen den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen.

Nach den hier gesammelten Erfahrungen liegt der schluß nahe, daß die Spurenelemente, sofern sie überhaupt in den Ablauf der Selbsterhitzung eingreifen, erst bei Temperaturen über 80°C eine Rolle spielen, also dann, wenn die biologische Phase in die chemische übergegangen ist.

Da diese Temperaturen unter den gegebenen Versuchsbedingungen nicht erreicht werden konnten, war es nicht möglich, diese Richtung der Untersuchung weiter zu verfolgen.

Gasanalysen

Versuch 4

Gleichzeitig mit den Temperaturmessungen wurden Prüfungen auf folgende Gase vorgenommen:

Kohlenoxyd

Ammoniak

Kohlenmonoxyd

Schwefelwasserstoff

Die Gasprüfung erfolgte durch Absaugen der Luft aus den Dewargefäßen mittels eines Drägergerätes durch ein spezifisches Indikatorröhrchen.

Ergebnisse der Gasprüfung:

Kohlendi oxyd

Material: Dactylis glomerata, In-frei, H₂O-Gehalt = 82,5%

Zeit	Temperatur	CO ₂	Vol %
2. Tag	10°C	+	2,5
3. "	15	+	3,0
4. "	13	+	3,5
7. "	24	+	8,0-9,0
8. "	36	+	10,0
9. "	30	+	3,5

(Tafel 5)

Ammoniak

Material: *Dactylis glomerata*, $\text{MnSO}_4 = 120 \text{ kg/ha}$

Wassergehalt = 81,5%

1. bis 8. Tag negativ

9. und 10. Tag: Spur, weniger als 0,05 mg/l Luft.

(Tafel 5)

Kohlenmonoxyd

Material: *Dactylis glomerata*, $\text{MnSO}_4 = 60 \text{ kg/ha}$,

Wassergehalt = 82,1%

1. bis 10. Tag negativ.

Die Ergebnisse der Versuche 4a und 4b sind auf Tafel 5 festgehalten. Es wurde versucht, aufgrund einer schematischen Darstellung die Menge des gefundenen CO₂ mit der Temperatur ins Verhältnis zu setzen.

Dabei konnten zwei interessante Feststellungen gemacht werden:

1. Die Menge des gefundenen CO₂ nimmt mit steigender Temperatur zu.
2. Die Entwicklung von Ammoniak beginnt erst, wenn die Entwicklung des CO₂ stark zurückgegangen ist, also bei absinkender Temperatur.

Versuch 43

Gemessenes CO_2 im Verlauf des Versuches

°g

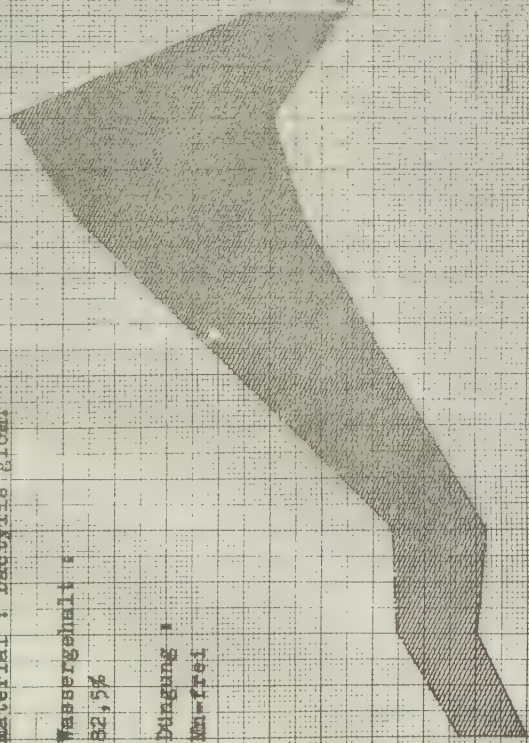
Material : Dactylis glom.

Wassergehalt :

82,5%

Düngung :

Kn.-frei



Versuch 5

Material: frisches Gras

Wassergehalt = 84,0%

Um zu prüfen, ob die Höhe der erreichten Temperatur auch mit der Menge des Versuchsmaterials in Verbindung zu bringen ist, wurden Versuche in größeren Dewargefäßen (1,5 - 2 l Inhalt) durchgeführt.

Hier wurden Temperaturen bis zu 65°C erreicht (Tafel 6). Die Maximaltemperatur lag am 6. Tag.

In diesem Versuch, bei dem mit der dreifachen Menge des bisher verwendeten Materials gearbeitet wurde, lag die Höchsttemperatur um 20°C über den bisher erreichten Spitzenwerten der Versuche 1 - 4.

Dieses Ergebnis zeigt, daß die Menge des aufgehäuften Materials einen entscheidenden Einfluß auf die Wärmesteigerung haben dürfte.

Nach Beendigung dieses Versuches wurde eine Probe des Materials zur Durchführung des Glathe-Tests entnommen.

Es wurde eine Erhöhung der thermophilen **Keime** festgestellt: 100 Millionen Keime bei einer Bebrütungstemperatur von 55°C, während ein gutes Heu bei gleicher Bebrütungstemperatur nur 0,002 Millionen Keime haben soll (nach GLATHE).

Da sich offensichtlich mit einer größeren Menge des Materials höhere Temperaturen erzielen lassen, wurden alle folgenden Versuche in Dewargefäßen von 1,5 - 2 l Inhalt durchgeführt.

Versuch 6

Material: frisches Wiesen gras

Wassergehalt 79,3%

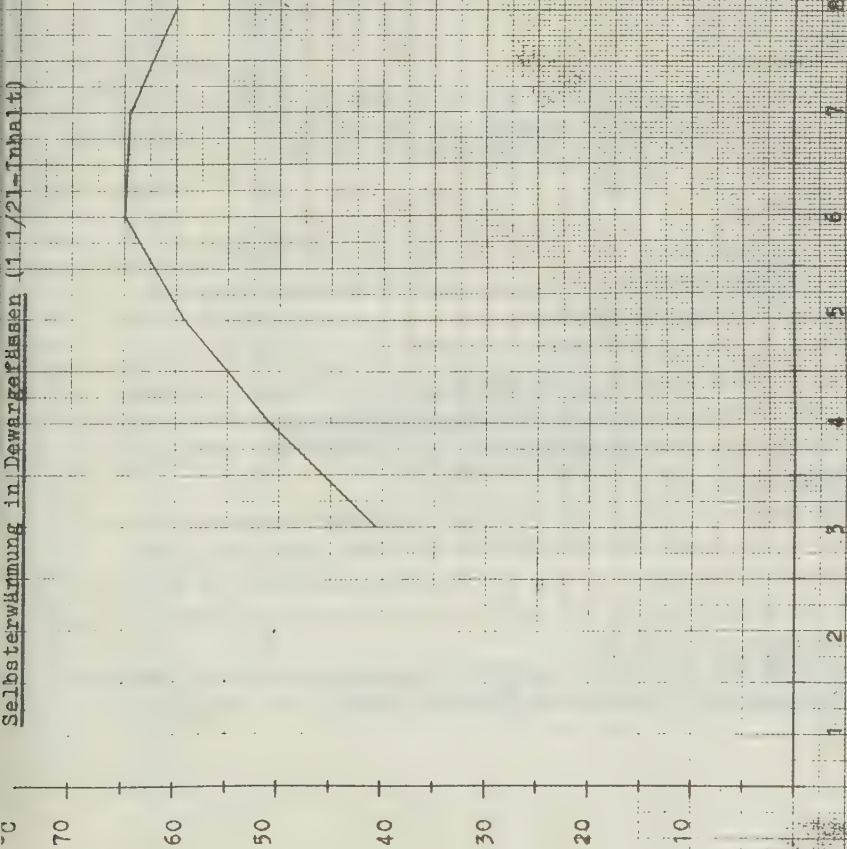
Hier wurden erstmalig zwei Temperaturmessungen durchgeführt und zwar eine im oberen und eine im unteren Bereich des Materials.

Versuch 5

Material : frisches Gras

Wassergehalt : 84,0%

(bisher höchster Wert mit 65%)



Zeit in Tagen

Die technische Durchführung bestand im Einbetten von zwei Glasröhrchen in das Material, die in verschiedenen Höhen endeten. Die Temperaturmessung erfolgte wiederum **thermoelektrisch**.

Der Zweck dieses Versuch lag darin, festzustellen, ob der Luftzutritt, der im oberen Bereich des Materials günstiger war (Stopfen aus Glaswolle) als im unteren, einen Einfluß auf die Wärmebildung hat.

Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

Vers.Nr.	Höchsttemp.im oberen Bereich	Höchsttemp. im unteren Bereich	Tafel
6a	52°C 5. Tag	44°C 5.Tag	7
6b	48 6. "	40 6. "	8
6c	57 5. "	51,5 5.u.6.Tag	9
6d	55 5. "	44,5 6. Tag	10

Die Besprechung dieser Ergebnisse, die Unterschiede bis zu 10,5°C in einem Gefäß erbrachten, erfolgt bei Versuch 8.

Versuch 7

Um die vier Gase aus einem Dewargefäß gleichzeitig qualitativ zu bestimmen, wurde folgende Versuchsanlage entwickelt (siehe Zeichnung):

Ein 2 l Dewargefäß wurde mit frischem Gras gefüllt und mit einem Korken fest verschlossen. Der Korken war von 2 Glasröhrchen durchbohrt: eines führte durch eine Waschflasche mit PdCl_2 (zum Abfangen des CO aus der Luft des Versuchsraumes).

Das zweite Röhrchen verband das Untersuchungsmaterial mit der Prüfanlage. Es führte über ein CaCl_2 -Röhrchen (zum Abfangen des Wassers aus dem Versuchsmaterial) in ein mit Natronasbest gefülltes Kölbchen (zur gewichtsmässigen Bestimmung von CO_2).

Auf dem Weg über ein weiteres CaCl_2 -Röhrchen wurde der Luftstrom nunmehr durch eine wässrige Lösung von CdSO_4 geleitet.

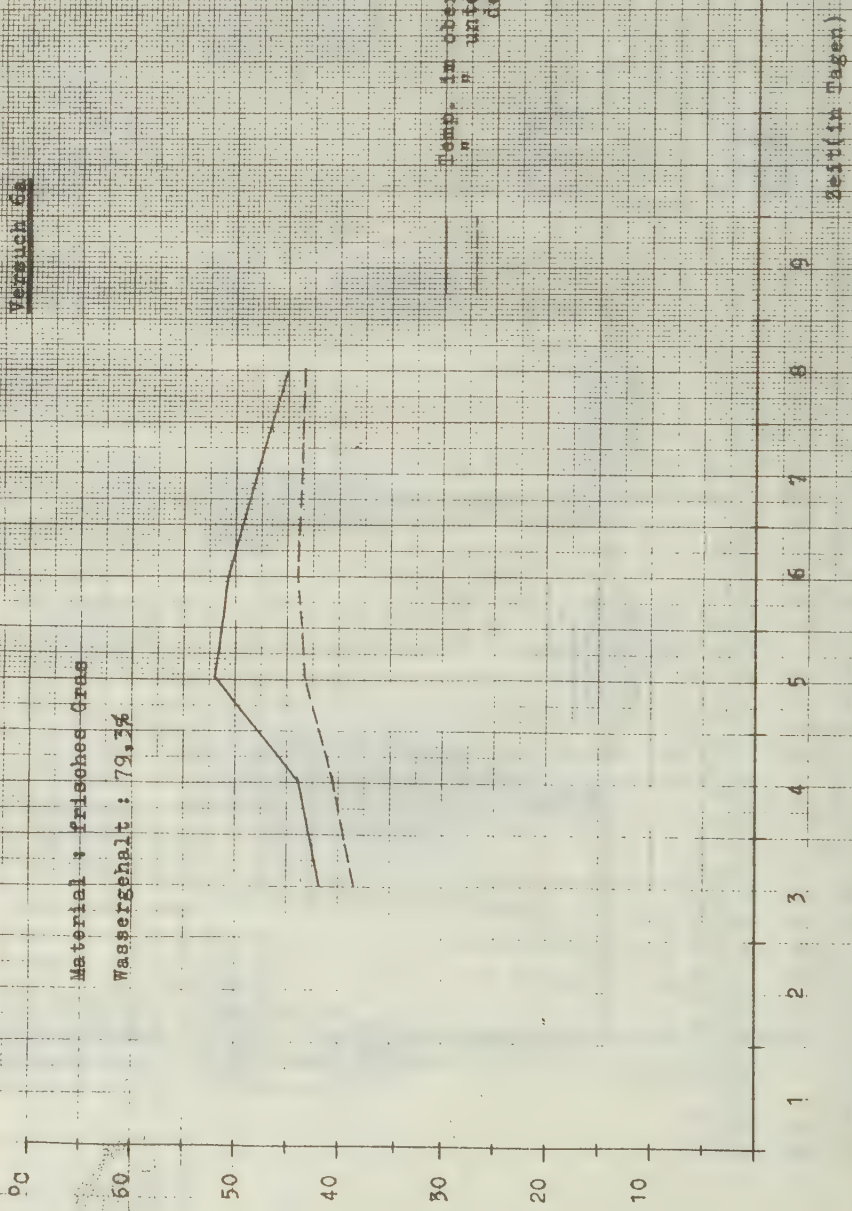
Selbsterwärmung in Dewargefäßen (2l-Inhalt)

Table 7

Versuch 6a

Material : frisches Gras

Wassergehalt : 79,3%



Temp. in oberen Bereich
" " unteren
des Materials

Zeit (in Tagen)

Selbsterwärmung in Dewargefäßen (2l-Inhalt)

Tafel 8

Versuch 6b

Material : frisches Gras

Wassergehalt : 79,3%

°C

50

40

30

20

10

1

2

3

4

5

6

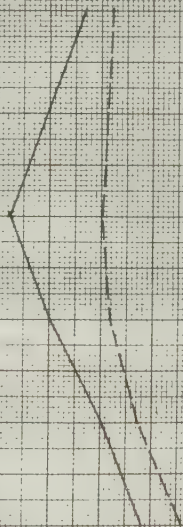
7

8

9

Zeit (in Tagen)

oberer Messbereich
unterer Messbereich



Selbstwärmung in Dewargefäßen (21. Februar)

21.2.1955

versucht 60

°C

60

50

40

30

20

10

Material : Eis-125 Grm

Wassergehalt : 73,1%

----- oberer Messbereich

----- unterer Messbereich

1

2

3

4

5

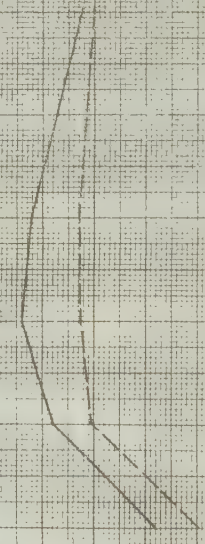
6

7

8

9

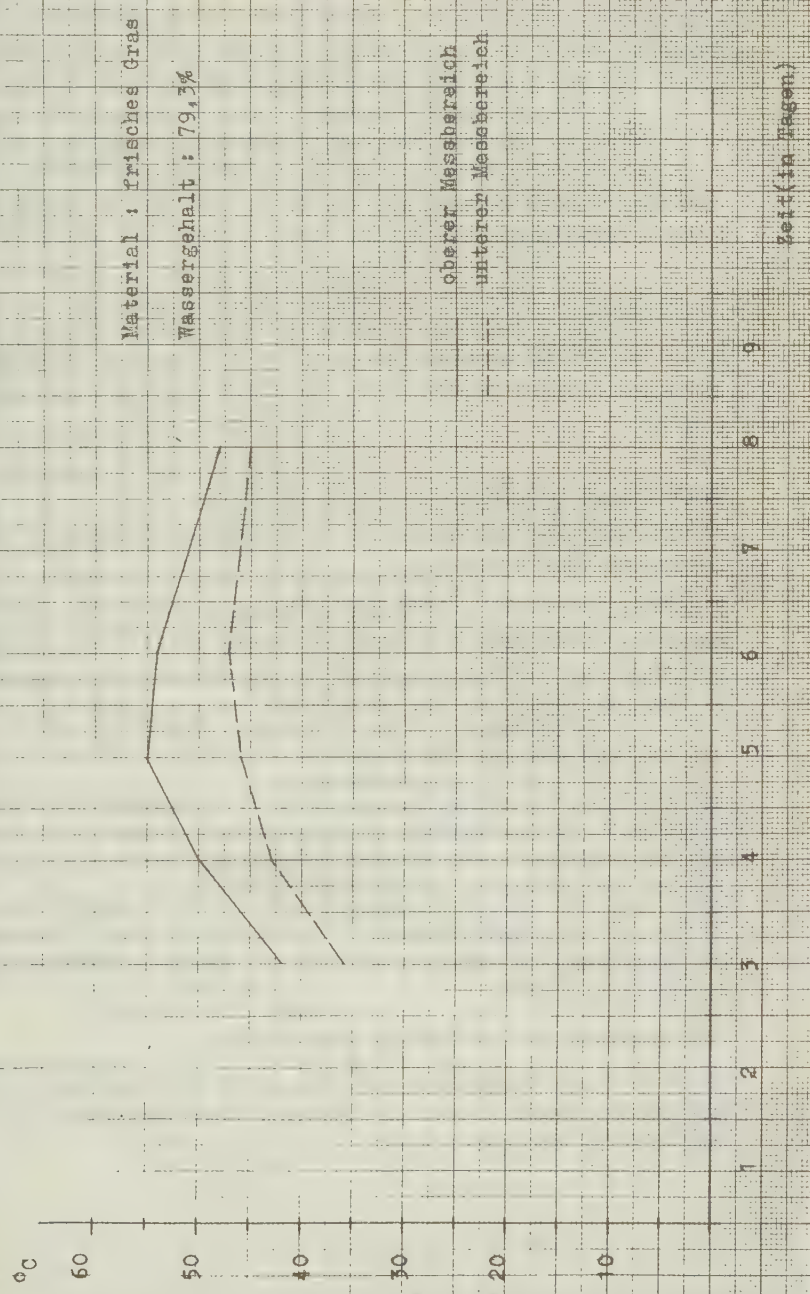
Zeit (in Tagen)



Selbsterwärmung in Dewargefäßen (2l-Inhalt)

Tafel 10

Versuch 6d



tet (zur H_2S -Bestimmung), dann weiter durch Neßler's Reagenz (zur Prüfung auf Ammoniak) und schließlich durch ein mit PdCl_2 getränktes Filtrierpapier (zur CO -Bestimmung)

Die Drähte des Thermoelementes mußten in das Versuchsmaterial mit eingebaut werden, da keine Einführungsöffnung gelassen werden konnte, um ein Entweichen der zu prüfenden Gase auszuschliessen.

Versuch 7a

mußte am 3. Tag abgebrochen werden, da ein Draht des Thermoelementes durchgerostet war, und die Temperaturmessung ausfiel.

Versuche 7b und 7c

Der gleiche Versuch wurde, ohne Berücksichtigung der Temperatur, zweimal wiederholt.

Eine gewichtsmässige Bestimmung von CO_2 war nicht möglich, da trotz eines großen CaCl_2 -Röhrchens zu viel Feuchtigkeit aus dem Versuchsmaterial in das Kölbchen mit Watronasbest gelangte.

Die Prüfung auf H_2S war negativ.

Die Prüfung auf Ammoniak mit Nessler's Reagenz war ebenfalls nicht durchführbar, da sich sofort nach dem Beginn des Versuches ein grauschwarzer Niederschlag bildete, der die Erkennung der Gelbfärbung durch Ammoniak unmöglich machte. Der Niederschlag deutet auf Spuren von Formaldehyd hin, das das erste Anzeichen des Kohlehydratableaus darstellen würde.

Das Ergebnis der CO -Prüfung war negativ.

Da sich diese Versuchsanlage als nicht sehr günstig erwiesen hatte, wurde wieder zur Messung einzelner Gase mit dem Dräger-Gerät übergegangen.

Versuch 8

Prüfung auf CO₂

Um das Ergebnis des Versuches 4a zu überprüfen, erschien es angebracht, denselben Versuch unter Verwendung eines 1,5 L Dewargefäßes zu wiederholen.

Das Ergebnis ist auf Tafel 11 dargestellt.

Wie zu erwarten, lag hier die Maximaltemperatur (mit 54°C am 5. Tag) höher, als bei Versuch 4a (36° am 8. Tag).

Die Feststellung, daß die Produktion von CO₂ abhängig ist von der Temperaturerhöhung, hat sich bestätigen lassen.

Versuch 9

Prüfung auf Ammoniak.

Frisches Material, Wassergehalt 77,4% wurde in 2 L -Dewar-Gefäßen angesetzt. Um das Entweichen entstehenden Ammoniaks durch den Glaswolleverschluß des Dewars zu verhindern, wurden die Versuchsgefäße mit dem offenen Ende nach unten aufgestellt. Die Gasmessung erfolgte durch zwei eingebettete Glasröhrchen, die an das Dräger-Gerät angeschlossen werden konnten.

Wieder wurden auch hier zwei Temperaturmessungen im oberen und im unteren Bereich des Materials durchgeführt.

Ergebnisse der täglichen Temperaturmessung:

Vers.Nr.

Maximaltemperatur

im oberen Bereich

im unteren Bereich

8a	45,5°C	am 5. Tag	55,5°C	am 5. Tag
8b	55,0	5. "	59,5	5. Tag
8c	55,0	5. "	55,0	5. Tag

Tafel 12 - 14

Die Gasmessung erfolgte täglich.

Erst am 10. Tag konnte Ammoniak nachgewiesen werden.

Selbsterwärmung in Dewargefäßen (1 l/Pfl.-Inhalt)

Tafel 11

Versuch 8

Darstellung des gefundenen CO₂ im Verlauf des Versuches

Material : Frisches Gras

Wassergehalt : 79,4%



Temperatur
Vol% CO₂

| = 1 Vol% CO₂

1 2 3 4 5 6 7 8 9
Zeit (in Tagen)

°C

60

50

40

30

20

10

Versuch 9a

Material : frisches Gras

Wassergehalt : 77,4%

°C

50

40

30

20

10

1

2

3

4

5

7

----- oberer Messbereich
----- unterer Messbereich

(Auftreten von Ammoniak am 10.Tag :
0,1 mg/l Luft)

Zeit (in Tagen)

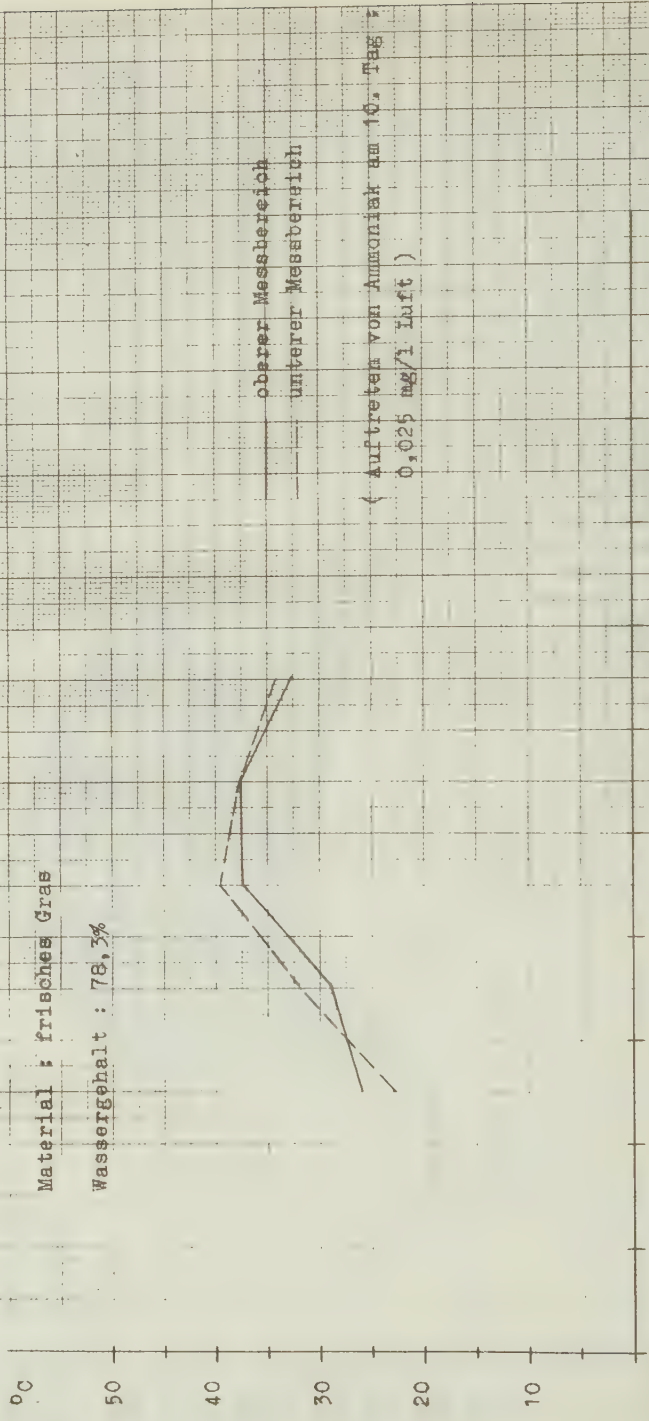
Selbsterwärmung in Dewargefäßen (Pl-Inhalt)

Titel 18

Versuch 9b

Material : frisches Gras

Wassergehalt : 78,3%



— oberer Messbereich
— unterer Messbereich

(Auftreten von Ammoniak am 10. Tag
0,025 mg/l Luft)

Zeit (in Tagen)

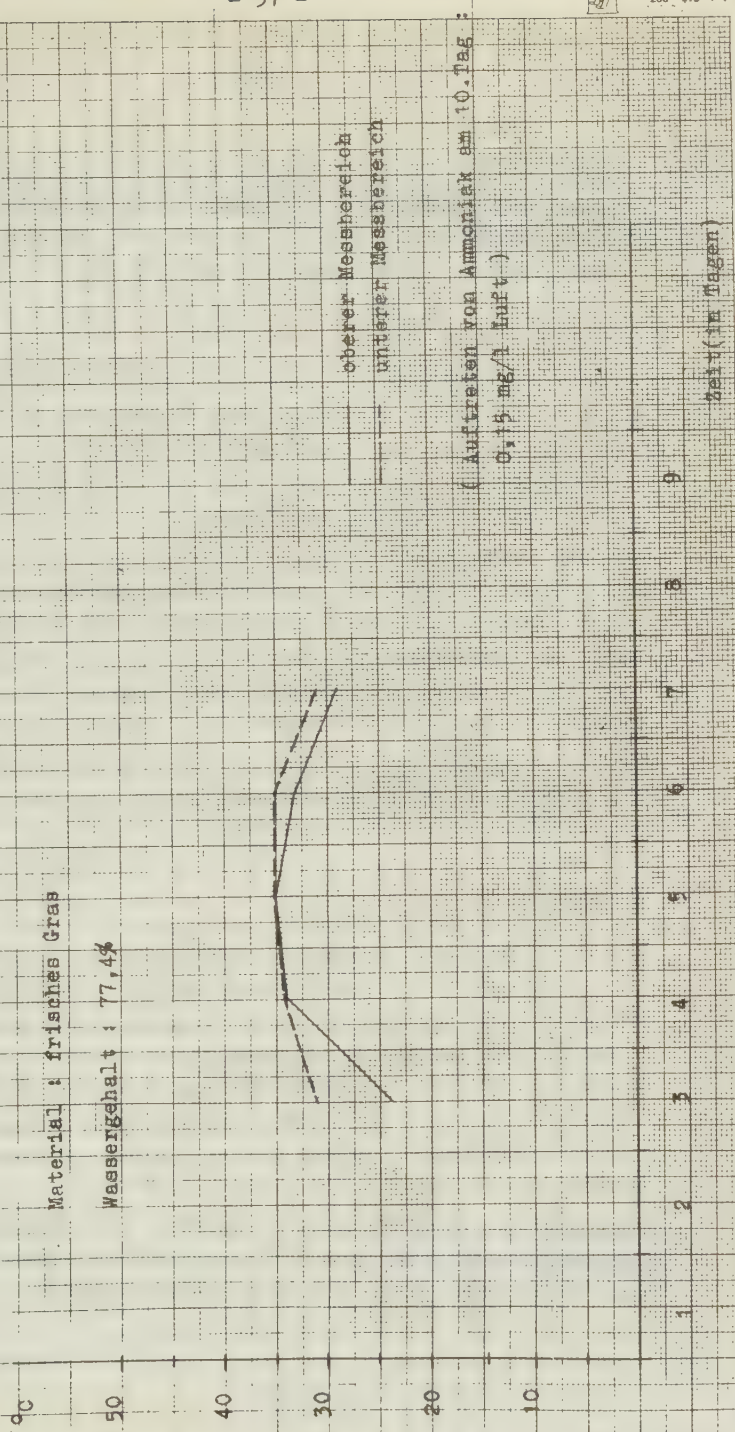
Table 14

Selbsterwärmung in Dewargefäßen (2l-Einhalt)

Versuch 9c

Material : frisches Gras

Wassergehalt : 77,4%



(Auftreten von Ammoniak am 10. Tag :
0,15 mg/l Luft)

— oberer Messbereich
--- unterer Messbereich

Ergebnisse der Gasprüfung:

9a = 0,1 mg NH₃/1 Luft

9b = 0,025

9c = 0,15

Einfluss des Luftsauerstoffes auf die Selbsterwärmung

Aus dem Vergleich der Temperaturergebnisse in den Versuchen 5a - d und 9a - c ergibt sich folgendes:

Die höchste Temperatur wird dann erreicht, wenn günstiger Luftzutritt gewährleistet ist.

Bei den Versuchen 5 a - d befand sich die nur mit Glaswolle verschlossene Öffnung der Dewargefäße oben. Die höchste Temperatur wurde im oberen Bereich des Versuchsmaterials gemessen. Bei den Versuchen 9a-c war diese Öffnung unten. Hier konnte im unteren Bereich die höchste Temperatur festgestellt werden.

Um die Bedeutung der Luftzufuhr für die Selbsterwärmung zu demonstrieren, wurde ein Versuch unter extremem Luftabschluß angesetzt.

Versuch 10

Ein mit Glaswolle isoliertes Dewar-Gefäß (Inhalt 2 l) wurde mit frischem, **kleingeschnittenem** Wiesengras gefüllt. Der Verschluss bestand in einem Korken, durch den ein Glasröhrchen zwecks Temperaturmessung in die Mitte des Materials führte. Das Gefäß wurde mit Kollodium völlig abgedichtet, der ganze Korken mit Kollodium überzogen, und das Glasröhrchen mit einem Gummistopfen luftdicht verschlossen.

Tägliche Temperaturmessungen ergaben, dass die Höchsttemperatur am 3. Tag mit 27°C erreicht war, zwei Tage auf dieser Höhe blieb und dann langsam absank.

Gleichzeitig wurde nochmals eine Prüfung auf Ammoniak vorgenommen, die aber zu keinem positiven Ergebnis führte (Spur erst am 29. Tag mit weniger als 0,05%).

Diskussion der Untersuchungsergebnisse im Hinblick auf ihre Auswertung für die Praxis

1. Auswahl des Untersuchungsmaterials:

Die Voraussetzung für zweckdienliche mikroskopische Analysen ist eine sachgemässe Probeentnahme.

Es ist für die Erfassung anatomischer Unterschiede und Veränderungen unerlässlich, genau zu wissen, ob das Pflanzenmaterial etwa direkt vom Glutkessel stammt, oder in weiterer Entfernung vom Brandherd entnommen wurde.

Vor allem das Vorhandensein der für die Selbsterhitzung typischen Merkmale (Abb. 13 - 18), wie z.B. der "Knötchenbildung", ist in der unmittelbaren Nähe des Glutkessels häufiger und auch leichter zu beobachten, als in dessen weiterer Umgebung.

Eine andere anatomische Besonderheit ist die Ausbildung der beschriebenen "Brandzone" im Mesophyll. Auch diese ist im Bereich der höchsten Temperaturen, also in unmittelbarer Nähe des Brandherdes deutlicher und sicherer festzustellen.

Zur mikroskopischen Betrachtung eignen sich weniger die Stengel- als vorwiegend die Blatteile, weshalb ein vorsichtiges Auseinandernehmen und Sortieren des pflanzlichen Materials voran zu erfolgen hat.

Die Betrachtung, Beurteilung und Beschreibung der sortierten ~~Tei~~chen nach dem äusseren Zustand, wie dem Grad der Verkohlungs oder Verfärbung ist ratsam, und für das Analysenprotokoll ein Beitrag.

Für die Auswahl der Blatteile aus dem Probengut gilt folgendes: Die Farbe der Gramineenblätter soll möglichst hellbraun bis dunkelbraun sein, also nicht so stark durch Verkohlung zerstört, dass sie staubig bröckeln.

Nach den gesammelten Erfahrungen ist es unmöglich, bereits schwarz verkohltes Material, auch wenn es in seiner äusseren Form zunächst noch erhalten scheint, für eine Untersuchung im Sinne dieser Arbeit auszuwerten.

Das mikroskopische Bild zeigt nur noch bröselige schwarze Teilchen, die keine, für die Auswertung verwendbare Gewebsdifferenzierung erkennen lassen. Die hell- bis dunkelbraunen Blatteile eignen sich am besten für Reihenuntersuchungen in anatomischer Hinsicht.

2. Aufbewahrung des Materials

Eingehende Versuche mit stufenweise 20-60%igem Alkohol, in den die Pflanzenteile bis zur mikroskopischen Präparation eingelegt wurden, zeigten ungünstige Ergebnisse. Es empfiehlt sich für das aus Brandproben stammende Material am besten eine lufttrockene Aufbewahrung bei Zimmertemperatur. Geeignet sind weite, offene Behälter aus Glas, oder auch offene Papiertüten. Es muss aber darauf geachtet werden, dass das Material in lockerer Packung aufbewahrt, also normal durchlüftet wird, und sich nicht in feuchten Räumen befindet, da Verschimmelungsgefahr besteht.

Stichproben nach zweijähriger Lagerzeit unter den geschilderten Bedingungen ergaben, dass weder eine äusserliche Veränderung des Materials (Verschimmelung), noch anatomische Veränderungen, die auf die Lagerung zurückzuführen wären, stattgefunden haben.

Es ist also bei sachgemässer Aufbewahrung durchaus möglich, noch nach mehreren Monaten ein Material für die mikroskopisch-anatomische Untersuchung heranzuziehen.

3. Vorbehandlung des Materials

Von den ausgewählten Blatteilen, die nach Möglichkeit keine äusserlich sichtbaren Beschädigungen durch Brand, Insektenfrass oder ähnl. aufweisen sollten, können ohne besondere

Vorbehandlung Mikroschnitte (Blattquerschnitte) angefertigt werden.

Um einzelne Teile noch schneidefähiger zu machen, können sie unmittelbar vor der Präparation 24 Stunden in 40%igen Alkohol eingelegt werden.

Es empfiehlt sich, alles Material zwischen Holundermark zu schneiden. Wachseinbettungen oder andere Methoden erwiesen sich als teilweise sehr ungünstig. Vor allen Dingen ist darauf zu achten, dass keinerlei Wärmeeinfluss gegeben ist und keine Lösungsmittel wie Xylol usw. Anwendung finden.

An dieser Stelle sei auch darauf hingewiesen, dass das Auftreten von "Zerreissungsräumen" im Blattgewebe, von denen anschliessend noch die Rede sein wird (siehe auch Abb. 8-12), nicht mit Beschädigungen des Blattgefüges durch unsachgemässes Schneiden verwechselt werden darf.

Zur mikroskopischen Untersuchung werden die angefertigten Blattquerschnitte in Glycerin eingelegt. (Sie können darin unbeschadet für evtl. Nachuntersuchungen lange Zeit aufbewahrt werden.)

Eine Aufhellung der Mikroschnitte durch Kochen in Chloralhydrat usw. empfiehlt sich nicht, da die Gefahr nachträglicher anatomischer Veränderungen gegeben ist.

4. Die mikroskopische Beurteilung

a) Unterscheidung zwischen frischem Material und normalem Heu:

In allen Proben, ob sie aus normalem, selbsterhitztem oder künstlich erhitztem Material stammen, kann man sekundär erststandene Interzellularräume im Parenchymgewebe zwischen den Leitbündeln beobachten. Sie sind derart angelegt, dass es letztlich zu erhalten gebliebenen "Parenchymbrücken" im Blattgewebe kommt. (Abb. 8-12, Text Seite 23).

Das Auftreten solcher "Zerreissungsräume" deutet immer darauf

hin,, dass das Material einen natürlichen Trocknungsprozess durchgemacht hat, und es sich niemals um frisches Gras handeln kann. Aller Wahrscheinlichkeit nach liegen hier völlig normale Abbauerscheinungen im Gramineenblatt vor, da ein gleichartiges Entstehen von Hohlräumen mit Hilfe von Hitze künstlich nicht erzeugt werden konnte.

Je nach dem Alterungsgrad des Blattes erscheinen die Interzellularräume kleiner oder grösser.

b) Unterscheidung zwischen normalem Heu und Brandheu:

Eine Entscheidung, ob es sich um ein normales Heu handelt oder um Brandheu, ist jetzt mit gewissem Vorbehalt möglich.

Der Blattquerschnitt durch ein normales Heu zeigt die gleichmässig zwischen den Leitbündeln auftretenden Hohlräume und die Parenchymbrücken. Eine auffallend dunkle Brandverfärbung des Gewebes ist nicht vorhanden. Die Epidermis weist keine Deformierungen auf (Abb. 8-12).

Brandheu ist äusserlich kenntlich durch die anomale Verfärbung des Materials. Die Färbung der Pflanzenteile geht vom hellen Strohgelb über Braun, Dunkelbraun, Schwarzbraun bis Schwarz, je nach dem Grad der Hitzeeinwirkung. Ausserdem strömt Brandheu, auch nach monatelanger Aufbewahrung noch einen charakteristischen Brandgeruch aus.

Für die Anatomie gilt folgendes:

c) Unterscheidung zwischen selbsterhitztem und künstlich erhitztem Material:

Zur Klärung der Frage, ob eine natürliche Selbsterhitzung oder eine künstlich herbeigeführte Erhitzung, möglicherweise also auch eine Brandstiftung vorliegt, lassen sich verschiedene anatomische Merkmale orientierend heranziehen.

Am auffälligsten ist stets die Ausbildung einer "Brandzone" unterhalb der Epidermis im künstlich erhitzten Material. Die Schwarzfärbung bestimmter Zellpartien (Abb. 19-25), die durch plötzliches Einwirken hoher Temperaturen zustande kommt, ist bei selbsterhitztem Material in dieser Form nicht zu beobachten.

Diese Tatsache ist darauf zurückzuführen, dass der Temperaturanstieg im selbsterhitzten Heustock bis zum Entzündungspunkt wesentlich langsamer, gewissermassen organisch erfolgt; es liegt eine stufenweise Erwärmung des Materials vor.

Bei einer Brandstiftung hingegen ist das Material oft innerhalb von Minuten sofort der Höchsttemperatur ausgesetzt.

Die Intensität dieser mikroskopisch wahrnehmbaren Verfärbung lässt auch vorsichtige Rückschlüsse auf die Hitzegrade zu, denen das Material ausgesetzt war, da die Verfärbung mit dem Anstieg der Temperatur zunimmt.

Ausserdem findet bei dem künstlich erhitzten Material eine Auftreibung der Epidermiszellwände nach aussen hin statt (Abb. 25 und 27). Diese Erscheinung kann ebenfalls auf das plötzliche Einwirken hoher Temperaturen zurückgeführt werden.

Ein sehr wesentliches Merkmal zur Unterscheidung ob ursprünglich eine Selbsterhitzung oder eine künstliche Erhitzung vorlag, ist der mikroskopische Nachweis kollabierter Zellwände unterhalb der Epidermis in Selbstentzündungsproben.

Dieses Kollabieren der Zellwände (Abb. 13-15) führt im Endstadium zu einer sehr auffälligen "Knötchenbildung" an der, dem Mesophyll zugewandten Seite der Epidermiszellen (Abb. 16 bis 18).

Diese Erscheinung ist ausschliesslich in Selbstentzündungsproben beobachtet worden. Sie dürfte somit ein sehr charakteristisches Merkmal darstellen.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass alle in dieser Arbeit erreichten Ergebnisse nur die Grundlage zu weiteren Untersuchungen bieten können.

Eine umfassende Klärung der Fragen ist nur durch die Vereinigung der verschiedenen Untersuchungsrichtungen möglich.

So konnten bereits durch physiologisch-chemische Untersuchungen hier einzelne Voraussetzungen geschaffen werden, deren mögliche Verwertbarkeit im experimentellen Teil diskutiert worden ist.

Es liess sich der Nachweis erbringen, dass die vom Wassergehalt und möglichen Luftzutritt abhängige Selbsterwärmung

mit einer CO_2 -Entwicklung parallel läuft, deren Maximum mit der Temperaturspitze zusammenfällt.

Im Rahmen der soeben geschilderten Auswertung anatomischer Befunde für die Praxis kommt jedoch diesen Erkenntnissen bislang nur untergeordnete Bedeutung zu.

Es ist vorerst noch nicht möglich, die Zusammenhänge zwischen den auffälligen anatomischen Veränderungen und den physiologischen Vorgängen zu überblicken.

Einerseits bieten aber die mikroskopischen Unterschiede des jeweiligen Pflanzenmaterials als erfassbare Gegebenheiten bereits neue Anhaltspunkte für die analytische Praxis, und andererseits ist man der Klärung der physiologischen Vorgänge indirekt wieder einen Schritt näher gekommen.

Zusammenfassung

Bei vergleichender Betrachtung der in der Literatur über Heuselbstentzündung vorhandenen Arbeiten fällt auf, dass der botanisch-anatomischen Untersuchung bisher keine nennenswerte achtung geschenkt worden ist. Es wurde versucht, diese Lücke zu schliessen. Als Ergebnis entsprechender Voruntersuchungen lag, als mikroskopisch am besten geeignet, das Blattmaterial von Gramineen, hier von Futtergräsern verschiedener Herkunft vor. Es wurden einander gegenübergestellt:

- a) Gras vom natürlichen Standort
- b) Normales Heu
- c) Heu nach echter Selbsterhitzung
- d) Gramineenblätter nach künstlicher Erhitzung

Nach der anatomischen Beschreibung der Blattquerschnitte von Gräsern des natürlichen Standortes (a) erfolgte die vergleichsweise Gegenüberstellung des übrigen Untersuchungsmaterials.

(b, c und d). Es konnten folgende Beobachtungen gemacht werden:

Die äussere Verfärbung des Blattes lässt keine Rückschlüsse über die Einflüsse zu, die das Blatt erlitten hat. Die mikroskopische Betrachtung ergibt, ob natürliche oder unnatürliche Abbaureaktionen eingetreten sind.

Bei der natürlichen Zersetzung des Mesophylls führen aller Wahrscheinlichkeit nach schizogene Vorgänge zur Entstehung charakteristischer Hohlräume. Diese sind mikroskopisch erkennbar und lassen je nach ihrer Anlage und Entwicklung Rückschlüsse über den Alterungsgrad zu.

Diese Vorgänge nehmen bei langsamer Alterung des Pflanzenmaterials und normaler Heulagerung einen regulären Verlauf, welcher bei gewaltsamer Zersetzung (d) von Pflanzenmaterial (Brandstiftung) nicht ausgelöst oder gestört, oder überstürzt unnatürlich beeinflusst werden. Teilweise lassen sich diese Folgen mikroskopisch selbst in weitgehend verbranntem Pflanzenmaterial noch erkennen.

Die mikroskopisch wahrnehmbare Verfärbung von sklerenchymatischen Zellen des Blattes lässt parallel zu dem Vorgenannten schätzungsweise Rückschlüsse über die Hitzegrade zu, denen das Pflanzenmaterial ausgesetzt war.

Bei den künstlich erhitzten Blättern findet neben der Verfärbung diverser Zellpartien, die auch in normalen Selbsterhitzungsfällen eintritt, zusätzlich eine anormale Zusammenballung und Verfärbung von Zellinhaltsstoffen statt. Betroffen sind in erster Linie die unter der Epidermis befindlichen Mesophyll-Zellen. Es bildet sich längst der Epidermis im Parenchymgewebe eine "Brandzone".

Auch diese wäre wiederum nur in der gesamten Gegenüberstellung der bis hierhin erfassten anatomischen Beobachtungen (Hohlräume, Sklerenchym- und Parenchymzerstörungen) verwertbar. Es liess sich jedoch nachweisen, dass bei derartigen Proben noch eine Auftreibung der Epidermiszellwände nach ausen stattfindet.

Neben den normalen Abbauerscheinungen stellt sich in verschiedenen Gramineenblättern eine eigenartige Deformation der Zellwände ein, die an die Epidermis Anschluss haben. Durch Kollabieren der (im Querschnitt gesehen) vertikalen Wände treten Zusammenfaltungen auf, die zu scheinbaren Wandverdickungen ("Knötchen") führen. Sie sind weder bei frischen noch bei künstlich erhitzten Gräsern beobachtet worden. Auch bei normal getrocknetem Heu war diese Erscheinung nicht zu beobachten. Dieses Kollabieren der Zellwände wurde immer nur in Material gefunden, das eine gleichmässige Selbsterhitzung durchgemacht hatte. Es wird vermutet, dass ihre schrittweise Entstehung den Zeitraum einer solchen Selbsterhitzung benötigt.

Über diese botanischen Feststellungen hinaus, lässt sich für die Praxis (Brandermittlung usw.) ergänzend folgendes sagen: Nach der mikroskopischen Untersuchung und Beschreibung dieser anatomischen Besonderheiten des Blattmaterials verschiedener Gramineen aus mehreren Modifikationen und der stets vergleichweisen Betrachtung werden sich künftig vorsichtige Rückschlüsse ziehen lassen. Es steht aber fest, dass in diesen Fällen wohl kaum ein anatomisches Merkmal allein Aufschluss geben kann, welcher Beeinflussung der zu analysierende Pflanzenteil ausgesetzt war.

Über den physiologisch-chemischen Teil der Arbeit lässt sich zusammenfassend folgendes sagen:

A. Die Selbsterwärmung ist abhängig

1. Vom Wassergehalt (Versuche 1 und 2),
2. Von der Möglichkeit des Luftzutritts (Versuche 6,8,9)
3. Von der Menge des Materials (Versuche 1 und 2),
wobei nicht nur die Temperaturhöhe beeinflusst wird, sondern mit steigenden Mengen die Zeit bis zum Erreichen des Maximalwertes erheblich heraufgesetzt erscheint. So zeigen die Versuche in 0,5l Dewargefäßen ein Temperaturmaximum etwa am 3. Tag, während bei der Verwendung von 1,5 - 2l Dewargefäßen die höchsten Temperaturwerte am 5. bzw. am 6. Tag zu beobachten waren.

B. Die gasanalytischen Untersuchungen ergaben:

1. Die CO_2 -Entwicklung, die sofort nach Beginn des Versuches einsetzte, lässt ein Maximum erkennen, das genau mit der Temperaturspitze zusammenfällt.
2. Ammoniak tritt erst zu einem erheblich späteren Zeitpunkt auf; der Nachweis war erst zu erbringen, nachdem die CO_2 -Produktion fast zum Stillstand gekommen war.
3. CO und H_2S konnten nicht nachgewiesen werden.
Durch ihr Fehlen in den unteren Temperaturbereichen kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass bei höheren Temperaturen - nach Beendigung der biologischen und Einsetzen der chemischen Reaktionen - CO und H_2S möglicherweise auftreten.
4. Die Ergebnisse der Versuche 7b und 7c deuten auf Spuren von Formalin hin.

Literaturverzeichnis

- ABU DOLEF MISARIS
BEN MOLHALHAL: Commentarius de itinere Asiatico,
ca 942. (aus: Medem, 1904).
- BAYERISCHE
VERSICHERUNGSKAMMER: Statistischer Bericht über das
145. Versicherungsjahr 1955/56,
Abteilung Brandversicherung
- BAYERISCHE
WARENVERMITTLUNG
LANDWIRTSCHAFTLICHER
GENOSSENSCHAFTEN: Das Einmaleins der Futterpflanzen.
München, 1957.
- BERTHELOT, H.: In Comptes rendus hebdomadaires
des séances de l'Académie des
sciences, Bd. 117, 1893.
- BÜCK, FRIEDRICH: Über Selbstentzündung. Schriften
d.Ver. z. Verbreit. Naturw.
Kenntnisse in Wien. 47. Band.
Vereinsjahr 1906/07. Wien 1907.
- BOEKHOUT, F.W.J. und
de VRIES, J.J. Ott: Über die Selbsterhitzung des Heues.
Centralblatt f. Bakteriologie, Pa-
rasitenkunde und Infektionskrank-
heiten. 2. Abtlg. 12. Band.
Gustav Fischer Verlag. Jena 1904.
- BORUFF, C.S. und
BUSHWELL, A.N.: Fermentation Products from Corn-
stalks. Indis. and Engin. Chem. 22,
1930
- BROWNE, CHARLES, A.: The spontaneous combustion of hay.
Technical bulletin No.141, Septem-
ber 1929, United States Departement
of Agriculture, Washington D.C.
- BURRI, R.: Die Selbsterhitzung lagernder
Pflanzenmassen mit besonderer Be-
rücksichtigung von Heu und Emd.
landw. Jahrbuch d. Schweiz, 33,
1919, Bern.
- COUFELIA: De re rustica, II, 19, ca. 60 n.Chr.
(aus Medem, 1904)
- DENTE, H.: Beiträge über den mikrobiellen Ab-
bau verschiedener Lignine und ihre
Bedeutung für die Bildung organi-
scher Bodensubstanz. (Inaug.Diss.)
Leipzig 1932
- U. RICHARD LANDWIRTS-
CHAFTLICHE GESELLSCHAFT
Anleitung zur Bewertung von Wiesen-
heu nach dem zweiteiligen DLG-Heu-
bewertungsschlüssel, DLG Verlag,
Frankfurt a.M., 1956.

- DRÄGERWERK LÜBECK: Beschreibung und Gebrauchsanweisung für das Gasspürgerät Modell 19/31, Prospekt 19-5/6, 4. Ausgabe, Mai 1955.
- DRÄGERWERK LÜBECK: Beschreibung und Gebrauchsanweisung für Gasprüfröhrchen, 5. Ausgabe, Februar 1957.
- DRAGENDORFF, Georg: Die qualitative und quantitative Analyse von Pflanzen und Pflanzenteilen. Vandenhoek und Ruprechts-Verlag, Göttingen 1882.
- FREITAG: Selbstentzündungen, hervorgerufen durch Einwirkungen des Luftsauerstoffes. Kriminalistische Monatshefte, 4. Jahrgang, Heft 11, November 1930.
- FREY-WYSSLING : Die Blattfermentation als Autolyse. Pflanzenphysiologisches Institut d. ETH Zürich, Vierteljahresschrift d. Naturforsch.Ges. in Zürich, 1943.
- GEERING, J. : Übergärung und Dürrfutterwert. Schweiz.Landw. Monatshefte, 17,39, 1939.
- G L A T H E, H.: Der heutige Stand der wissenschaftlichen Erforschung der Selbsterhitzung von Erntestoffen. Beiträge zur Lehre v.d. Brandermittlung, Kiel 1952.
- HEINTZELLER, IRENE: Das Wachstum der Schimmelpilze in Abhängigkeit von den Hydraturverhältnissen unter verschiedenen Aussenbedingungen. Archiv f. Mikrobiologie, 10. Band, 1. Heft. Verlag Julius Springer, Berlin 1939.
- HILDEBRAND, E.: Beiträge zur Frage der Selbsterwärmung des Heues. Diss. Landw. Hochschule Berlin, und Zentralblatt f. Bakteriologie, 2. Abtlg., 71, 1927.
- HOFFMAN, E.J.: Oxidation and Gas formation in the spontaneous heating of hay. Journal of agricultural Research, Vol.51. No 6, September 1935.
- HOFFMAN E.J. and BRADSHAW, M.A.: losses of organic substance in the spontaneous heating of alfalfa hay. Journal of agricultural Research, Vol 5, No 3, Washington D.C., February 1937.

HRABOWSKI, WERNER und
RUDER, L.:

Zur mikroskopischen Beurteilung
von überhitztem Heu. Zeitsch.f. Pfl.
bau u. Pfl.schutz, Jahrg.5., Heft 6,
München 1954.

HÜNI, KARL:

Physikalische und chemische Unter-
suchungen an Dürrfutter verschiede-
nen Gärungszustandes. Diss. an der
ETH Zürich, 1944.

HÜNI, KARL:

Die Selbstentzündung von Heu. Be-
richt über die 7. Kriminalarbeits-
tagung d. Polizeiinstitutes Hil-
trup, 3.-6-11. 1953

JAMES, LAWRENCE H. and
PRICE, DAVID, J.:

Observations on heating hay etc.
Science, New Series, Vol. LXVII,
January - June 1928, New York,
The Science Press.

JENSEN, H.J.:

Die Selbsterhitzung des Heues und
die Tabakfermentation. Archiv für
Mikrobiologie, 1, 365, 1937.

JORDI, ERNST:

Die Selbstentzündung von Heu- und
Emdstöcken, Brugg 1937.

JUON, P.:

Über den Einfluss der Futterkonser-
vierung auf die Bestandteile der
Zellwand. Landw. Vers. Station 120,
1934.

KINZEL, W.:

Massregeln gegen Scheunenbrände,
hervorgerufen durch Überhitzung
und Selbstentzündung von Heu und
Grummet. Prakt.Blätter f.Pfl.bau
u. Pfl.schutz, 4. Jahrg., Heft 4,
Juli 1926

KNITTEL, OTTO:

Neue Wege der Brandursachenfor-
schung, Innsbruck 1923.

LANDWIRTSCHAFTLICHES
WOCHENBLATT :

Gegen Heuselbstentzündung vorbeu-
gen. 1. Augustwoche 1957, Münchner
Zeitungsverlag.

LAUPPER, G.:

Die Schäden der Landwirtschaft in-
folge Selbstentzündung der Heu-
stöcke. Matériaux pour l'étude des
calamités, Société de Géographie,
1926/27, No.10, Geneve 1926.

LAUPPER, G.:

Oel, ein gefährlicher Brandstifter.
Matériaux pour l'étude des calami-
tés. Société de Géographie, Nr.19,
Genève 1928-29 .

- LAUPPER, G.: Die neuesten Ergebnisse der Heubrandforschung. Landw. Jahrbuch d. Schweiz, 43, 278, 1939.
- MEDEM : Über Selbstentzündung und Brandstiftung. Greifswald 1904.
- MIEHE, HUGO: Die Braunheubereitung. Arbeiten d. DLG, Heft 111, 2. Auflage, Paul Parey Verlag Berlin, Oktober 1905.
- MIEHE, HUGO: Über die Selbsterhitzung des Heues. Arbeiten der DLG, Heft 196, Paul Parey Verlag Berlin, 1911.
- MIEHE, Hugo: Die Wärmebildung von Reinkulturen im Hinblick auf die Ätiologie der Selbsterhitzung pflanzlicher Stoffe. Archiv für Mikrobiologie, 1, 78, 1926.
- NIESE, G.: Zwischenbericht zu dem Forschungsauftrag "Untersuchungen über die Morphologie und Physiologie der thermogenen und thermophilen Mikroorganismen. Gl. 14/4" erstattet von G. Niese, Dipl. Landwirt, Giessen, 9. 1. 58.
- NOLZ, JOSEF: Die Gärungsvorgänge im Heu und die Selbsterhitzung desselben. Fortschritte der Landwirtschaft, 1. Jahrgang, Julius Springer Verlag, Wien 1926.
- PALLMANN, H. und DÖNZ, O.: Die Übergärung, Überhitzung und Selbstentzündung des Dürrfutters. Die Resultate der Versuchsanlage Rossberg im Kemttal. Verlag Gebäudeversicherung, Zürich 1939.
- PALLMANN, H. , HÜML, K. und DÖNZ, O.: Der Wärmehaushalt und die Kontrolle überhitzter Futterstöcke. Zur Diagnose der Selbstentzündung von Dürrfutter- und Getreidestöcken. Landwirtsch. Monatshefte, 23. Jahrg. Nr. 9, 1945.
- PFRINGSHEIM, H. und FUCHS, H. : Über den bakteriellen Abbau von Ligninsäure. Berichte Deutsch. Chem. Gesellschaft, 56, 1923.
- PHILLIPS, Max und MITARBEITER The microbiological decomposition of the constituents of Alfalfa Hay. Journal of agricultural Research Vol. 50, No. 9, 1. May 1935
- PLINIUS: Nat. Hist. XVIII, 28, ca. 60 n. Chr. (aus Medem 1904).

- POELT, H.: Über die Scheunennachtrocknung von Heu und Grummet durch Belüftung mit Kaltluft, Praktische Blätter für Pfl.bau und Pfl. schutz, 3, 52. Jahrg. München 1957.
- RANKE: Annalen der Chemie und Pharmacie, Bd. 167, 1873
- SCHARRER KARL: Biochemie der Spurenelemente. Paul Parey Verlag, Berlin 1941.
- SCHWARZ, H.: Die Rolle des Eisens, des Ammoniaks, Wassers, Mikroorganismen im Heubrandproblem. Vierteljahresschrift Naturforsch. Ges. in Zürich, 76, 316, 1931.
- SPECHT, W. und KATTE, W.: Begutachtungsgrundlagen bei Selbstentzündung von Heu und Grummet. Kriminalwissenschaft, Beitr. aus der ges. Kriminalwissenschaft und Grenzgebieten, Jahrgang 1, Nr. 1, März 1957.
- STRASBURGER, E.: Lehrbuch der Botanik für Hochschulen, 26. Auflage, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart 1954.
- TENNEY, F. and WAXSMAN, S.A.: Composition of natural organic materials and their decomposition in the various organic complexes in different plant materials, under aerobic conditions. Soil Sci. 28, 1929.
- TRUENINGER, E.: Zur Frage der Selbsterhitzung und Selbstentzündung des Dürrfutters. Landw. Jahrbuch der Schweiz, 43, 278, 1929.
- ... and H.M.: The decomposition of lignified materials by soil-micro-organisms. Soil Sci. 30, 1930 -

Lebenslauf

Am 13. September 1934 wurde ich als Tochter des Fabrikanten Dr. Max ZENTZ und seiner Ehefrau Elisabeth, geb. Fechter in München geboren.

Nach dem Besuch der Volksschule in München und Garmisch trat ich im Dezember 1945 in die Mädchenoberrealschule der Missionsbenediktinerinnen in Tutzing ein. Von 1949 bis 1953 besuchte ich das Mädchenrealgymnasium der Armen Schulschwestern am Anger in München, und legte dort im Juni 1953 das Abitur ab.

Vom Wintersemester 1953/54 an studierte ich an der Universität und der Technischen Hochschule in München Naturwissenschaften. Vom Januar 1957 bis März 1959 fertigte ich an der Bayerischen Landesanstalt für Pflanzenbau und Pflanzenschutz in München unter der Leitung von Herrn Dr.rer.nat. W.HRABOWSKI die vorliegende Dissertation an.

